

École doctorale n° 432 : SMI - Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité “ Sciences et génie des activités à risques ”

présentée et soutenue publiquement par

Abdelhak IMOUSSATEN

le 17 novembre 2011

Modélisation et pilotage de la phase de délibération dans une décision collective
- vers le management d'activités à risques -

Directeur de thèse : **Jacky MONTMAIN**
Co-encadrement de la thèse : **Eric RIGAUD**

Jury

M. Patrice PERNY, Professeur, UPMC, CNRS
M. Henri PRADE, DR CNRS, IRIT
M. José RAGOT, Professeur, CRAN, INPL
M. Gilles MAURIS, MCF, LISTIC, Université de Savoie
M. Jean SALLANTIN, DR CNRS, LIRMM, UM2
M. Jacky MONTMAIN, Professeur, LGI2P, EMA
M. Eric RIGAUD, AR, CRC, MINES ParisTech

Président de jury
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Directeur de thèse
Co-directeur de thèse

**T
H
È
S
E**

A Thabzouhthe.

Remerciements

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Jacky Montmain pour son encadrement, ses nombreux conseils, son soutien constant tout au long de ma thèse et surtout la confiance qu'il m'a accordée au cours de ces années. Travailler avec Jacky a été un grand bonheur sur le plan humain et scientifique.

Un grand merci à l'homme de l'ombre François Troussel qui m'a été d'une grande aide scientifique pendant mes deux dernières années de thèse. Je le remercie chaleureusement d'avoir participé à l'accomplissement de cette thèse, avec beaucoup de compétence, d'enthousiasme et de disponibilité.

Je remercie Eric Rigaud, d'avoir accepté de codiriger cette thèse à Sophia Antipolis pour sa rigueur et son implication dans l'avancement et le suivi de ma thèse dans le cadre de notre formation doctorale Sciences et Génie des Activités à Risques, avec notamment l'organisation de séminaires réguliers à cet effet.

Je remercie aussi Agnès Rico, Fabien Rico et Christophe Labreuche. Je suis reconnaissant de l'enrichissement qu'ils ont apporté à ma thèse grâce aux travaux que nous avons menés ensemble.

Je remercie Messieurs Henri Prade et José Ragot d'avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse, ainsi que pour leurs jugements très pertinents sur mon manuscrit.

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur Patrice Perny d'avoir accepté la présidence du jury et montré de ce fait l'intérêt qu'il porte à ce travail.

Je remercie également Messieurs Gilles Mauris et Jean Sallantin qui m'ont fait l'honneur de faire partie de mon jury de thèse, je leur exprime ma profonde gratitude.

Je remercie tous les chercheurs, enseignants et membres du personnel du laboratoire LGI2P pour leur amitié et leur aide pendant ces trois années de thèse. Un grand merci à toute l'équipe du CRC pour son accueil chaleureux durant tous les séminaires auxquels j'ai pu assister.

Je tiens à remercier tous les doctorants du LGI2P et du CRC avec qui j'ai partagé de très bons moments.

Je remercie enfin Valérie Roman, Claude Badiou et Patricia Rondeau au LGI2P, Myriam Perrault Lavigne et Sandrine Renaux au CRC pour m'avoir grandement facilité le travail administratif.

Table des matières

Introduction générale	17
L'homme, sa relation aux systèmes d'information	17
Le concept d'automatisation cognitive	17
Attention et structuration des représentations mentales	19
Quelles aides à la décision ?.....	20
Objectifs des travaux	21
Plan du manuscrit	22
 Chapitre 1. : Automatisation Cognitive et décisions collectives	25
1.Genèse du concept d'automatisation cognitive.....	26
1.1 Conduite avancée ou aide à l'opérateur ? Quel degré d'automatisation ?	28
1.2 La situation de conduite	29
1.3 Automatisation cognitive et informatique décisionnelle	31
2.Quelles activités cognitives automatiser ?	33
2.1 Les activités cognitives	33
2.2 Performances attendues de la relation homme/machine	36
3.Fiabilité humaine et aide à la décision.....	37
3.1 L'erreur humaine	38
3.2 Typologie des erreurs humaines	39
3.3 Conséquences sur la conception du système d'aide à la décision	44
4.Un exemple de décision d'organisation : activités à risques et sécurité industrielle.....	51
4.1 Gouvernance des activités à risques	51
4.2 Dynamique des situations décisionnelles.....	53
4.3 Une décision d'organisation multicritère et multi points de vue	56
4.4 Conclusion et objectifs.....	61

5.Quelles grandeurs choisir pour piloter une décision d'organisation ?.....	64
5.1 A propos des interactions.....	65
5.2 A propos des incohérences.....	67
5.2.1 Critères antagonistes	68
5.2.2 Subjectivité des interprétations	70
5.2.3 Subjectivité du modèle d'évaluation	71
5.3 Explication et argumentation de décisions	74
6.Quels enseignements pour nos modèles de décisions collectives ?	76
 Chapitre 2. : Fusion d'avis et pilotage de la délibération	81
1.Introduction	82
2.Principe général.....	83
3.Rappels sur la logique floue.....	90
3.1 La théorie des sous-ensembles flous.....	90
3.2 La théorie des possibilités.....	92
3.2.1 Mesure et distribution de possibilité	92
3.2.2 Mesure et distribution de nécessité	93
3.2.3 Relations entre mesures de possibilité et de nécessité	93
3.2.4 Mesure floue.....	94
3.2.5 Fonctions de croyances et de crédibilité	94
4.Fusion d'évaluations sous forme d'intervalles.....	95
4.1 Les éléments focaux sont des singletons	96
4.2 Les éléments focaux sont emboîtés.....	97
4.3 Les éléments focaux sont cohérents.....	98
4.4 Les éléments focaux sont incohérents.....	100
4.5 Indicateurs de description d'une distribution de possibilité	100
5.Agrégation des distributions de possibilité	101
5.1 Intégrale floue sur des scores précis	103
5.2 Intégrale floue sur des scores imprécis	105

6.Le modèle proposé pour la fusion d’avis d’experts.....	106
6.1 La représentation des avis	107
6.2 La fusion des avis.....	107
6.3 Choix des indicateurs	109
6.4 L’agrégation des avis fusionnés.....	109
6.4.1 Cas monomodal.....	111
6.4.2 Cas multimodal	111
6.4.3 Comparaison des alternatives.....	112
6.4.4 Contributions à l’imprécision de la distribution agrégée	113
6.4.5 Identification des critères à débattre.....	114
7.Exemple d’illustration : la décision en cellule de crise	115
8.Conclusion.....	126
 Chapitre 3. Influence dans un réseau social et pilotage de la délibération	 129
1.Introduction	130
2.Rappel sur les notions liées à la modélisation d’un débat	131
2.1 La notion d’influence dans un réseau social	132
2.1.1 Pouvoir décisionnel d’un acteur (Grabisch and Rusinowska, 2009)	132
2.1.2 Capacité d’un acteur dans un modèle de débat (Rico et al., 2004)	134
2.2 La notion de dynamique dans un débat.....	135
2.2.1 Révision des convictions des acteurs	136
2.2.2 Argumentation et révision des connaissances	137
2.3 La notion de contrôle d’un débat	143
3.Modèle de débat basé sur l’argumentation	144
3.1 Notations	145
3.2 L’étape de la collecte d’informations	146
3.3 L’étape de l’évaluation	147
3.4 L’étude de l’influence	149
3.5 Conclusion	151

4.Modèle de débat basé sur les équations d'état des convictions	152
4.1 Pouvoir décisionnel et capacité.....	152
4.2 Evolution des probabilités au cours du temps.....	154
4.3 Equations d'état de la conviction	156
4.3.1 Les acteurs partagent la même préférence	157
4.3.2 Échange antagoniste	158
4.4 Le calcul de préférences.....	160
4.5 Illustrations	160
4.5.1 Simulation de l'issue des débats.....	160
4.5.2 Le débat comme un processus d'aide à la décision.....	163
4.6 Conclusion	165
5.Conclusion.....	166
 Chapitre 4. Amélioration multicritère d'options : pilotage de la négociation dans l'hypothèse collaborative.....	169
1.Introduction	170
2.Travaux liés : modèles qualitatifs et amélioration de systèmes complexes	172
2.1 Préférences managériales versus contraintes opérationnelles.....	172
2.2 Modèles de comportements qualitatifs	174
2.3 Systèmes adaptatifs dynamiques et ingénierie dirigée par les modèles.....	177
2.4 Amélioration multicritère.....	178
2.4.1 Agrégation et amélioration multicritère	179
2.4.2 Les critères à améliorer en priorité.....	179
3.Approche collaborative de l'amélioration de systèmes compelxes	182
3.1 Procédure itérative d'amélioration.....	185
3.2 Le modèle qualitatif	186
3.3 Un cadre de raisonnement.....	189
3.4 Agrégation sur A^*	191
3.5 Plan d'action α – <i>admissible</i>	192
3.6 Formalisation du problème de recherche de plan d'action admissible et efficient...	193

4.Le problème de résolution sous contraintes pour l'amélioration des performances .. 194

4.1	Le principe général du <i>Branch & Bound</i>	195
4.2	Mise à jour des solutions du front de Pareto	197
4.3	Réduction initiale	198
4.4	Sélection de l'action : (CHOOSE)	199
4.4.1	Sélection d'actions nécessaires à la viabilité du plan d'action (<i>NS</i>)	201
4.4.2	Sélection des actions les plus contraignantes (<i>MC</i>)	201
4.4.3	Le choix d'action le plus sélectif (<i>MR</i>)	202
4.5	Réduire l'ensemble des actions restantes (<i>REDUCE</i>)	202
4.5.1	Réduction des actions mutuellement exclusives (<i>XCL</i>)	202
4.5.2	Réduction en fonction du nombre d'actions dans SAP_j	203
4.5.3	Réduction des actions bloquantes (<i>LA : Locking Actions</i>)	203
4.5.4	Réduction des actions restrictives pour le coût (<i>LC : Locking Cost</i>)	204
4.5.5	Réduction des actions incompatibles pour l'admissibilité (<i>INC</i>)	204
4.5.6	Réduction des actions restrictives pour l'admissibilité (<i>R</i>)	204
4.5.7	Réductions de Pareto	205
4.5.8	Réductions de la borne supérieure d'admissibilité	206
4.6	Terminaison, complétude et consistance	208

5.Discussion 208

Chapitre 5. Amélioration multicritère d'options : pilotage de la négociation dans l'hypothèse coopérative 211

1.Introduction 212

2.Contexte de l'approche 213

2.1	Approche collaborative vs approche coopérative	213
2.2	La théorie d'argumentation	214

3.Le modèle de débat entre les départements 215

3.1	Le modèle qualitatif pour les relations entre actions et performances adapté à l'hypothèse coopérative	217
3.2	Connaissances et préférences des départements	219
3.2.1	Connaissances des départements	219

3.2.2	Arguments des départements	220
3.2.3	Les préférences des départements	221
3.3	La structure du débat.....	222
3.3.1	Le principe général.....	222
3.3.2	La sélection des plans d'action.....	223
3.3.3	La relation d'attaque.....	225
3.3.4	Le partage des connaissances pour un but collectif	225
3.4	Propriétés du cadre d'argumentation	226
4.	Intérêts et limites de l'approche.....	228
4.1	Intérêts.....	228
4.2	Limites	228
5.	Illustration.....	229
5.1	Présentation du cas d'étude.....	229
5.2	Les étapes de 1 à 5	230
5.3	L'hypothèse collaborative.....	231
5.3.1	Attitude pessimiste	232
5.3.2	Attitude optimiste.....	233
5.4	L'hypothèse coopérative	234
6.	Conclusion.....	236
	 Conclusion générale	 239

Table des figures

Figure 0.1 : Un effort adapté aux exigences de la tâche.....	19
Figure 1.1 : Schéma de principe du modèle de Rasmussen.....	34
Figure 1.2 : Erreurs au niveau SB	40
Figure 1.3 : Erreurs au niveau RB	41
Figure 1.4 : Erreurs au niveau KB.....	43
Figure 1.5 : Les situations de management des risques.....	56
Figure 1.6 : Prospective en sécurité industrielle (DiGITIP, 2003).....	62
Figure 1.7 : Les différents niveaux de décision dans la gestion de la sécurité d'un système industriel	67
Figure 1.8 : Points de vue opérationnel et stratégique du management des risques.....	73
Figure 1.9 : Différents niveaux de pilotage	76
Figure 1.10 : Contraintes et préférences, actions et performances	77
Figure 1.11 : Typologie des décisions pour la conception et la mise en œuvre d'une amélioration de la sécurité industrielle.....	80
Figure 2.1 : Perte d'information par rapport au système appréhendé (Bouchon-Meunier, 1995)	85
Figure 2.2 : Les distributions partielles de l'union de distributions de possibilité	114
Figure 2.3 : La boucle de rétroaction pour orienter le débat d'experts	115
Figure 2.4 : L'intégrale de Choquet 2-additive pour les cinq critères de la gestion de crise	118
Figure 2.5 : Saisie des préférences du décideur	118
Figure 2.6 : Evaluation des alternatives par l'expert SMITH	119
Figure 2.7 : Le résultat de la fusion pour le critère « Conséquences physiques » (cas de l'alternative « évacuer »)	120
Figure 2.8 : Le résultat de la fusion pour le critère « Conséquences physiques » (cas de l'alternative « Ne pas évacuer »)	121
Figure 2.9 : Agrégation des distributions des critères pour l'alternative « Evacuer »	122
Figure 2.10 : Agrégation des distributions des critères pour l'alternative « Ne Pas Evacuer »	122
Figure 2.11 : Contributions des critères à l'imprécision moyenne de la distribution de nécessité agrégée de l'alternative « Evacuer ».....	123
Figure 2.12 : Contributions des critères à l'imprécision moyenne de la distribution de nécessité agrégée de l'alternative « Ne Pas Evacuer ».....	123

Figure 2.13 : Distributions construites après le changement des avis pour le critère « conséquences physiques »	125
Figure 2.14 : Nouvelles agrégations des distributions des critères.....	125
Figure 3.1 : Délibération anarchique	143
Figure 3.2 : Lien entre la probabilité du choix d'un acteur et la différence d'utilité (le gain)	149
Figure 3.3: Schéma de principe du processus de délibération.....	151
Figure 3.4 : Echange synergique	157
Figure 3.5 : Echange révisionniste	158
Figure 3.6 : Echange antagoniste	159
Figure 3.7 : Simulation des issues du débat pour 4 cas d'influence, 50 convictions initiales et 200 permutations	162
Figure 3.8 : Simulation du vote pondéré et du débat.....	165
Figure 4.1 : Les différentes grandeurs impliquées dans l'évolution d'un système complexe	185
Figure 4.2 : Exemple d'un graphe d'influence	188
Figure 4.3 : L'espace de recherche est un arbre binaire.....	196
Figure 5.1 : Exemple d'un plan d'action partiel	221
Figure 5.2 Situation (t=1) quand mgr3 commence le débat – les actions et leur propriétaire ont la même couleur	235
Figure 5.3 : Situation (t=2) après l'attaque de mgr1 contre mgr3 qui fournit la solution (cost=2, le gain de mgr1 et de mgr3 est 1).....	236

Table des tableaux

Tableau 1.1 : Défaillances humaines dans le processus de décision et aides informatisées	48
Tableau 1.2 : Interactions dans la décision.....	67
Tableau 2.1 : Evaluations des experts	120
Tableau 2.2 : Changement des avis de l'expert 5.....	124
Tableau 5.1 : Les poids, les coûts et les performances initiales.	231
Tableau 5.2 - Les coefficients d'interactions	231
Tableau 5.3 : Les relations entre actions et performances des critères.....	233
Tableau 5.4 : Comparaison des attitudes décisionnelles	234

Introduction générale

L'homme, sa relation aux systèmes d'information

Depuis quelques décennies, la recherche en informatique, automatique et mathématiques s'est efforcée de développer des modèles et des outils pour la maîtrise des systèmes complexes, techniques ou sociotechniques (Sanchez, 2007). En effet, la complexité des systèmes dans lesquels l'homme est impliqué aujourd'hui conduit à l'émergence de systèmes dynamiques de traitement de l'information (STI) de plus en plus sophistiqués et incontournables (Montmain, 2000a) ; (Celse, Gentil and Montmain, 2007). A notre sens, la relation complexe qui s'instaure alors entre l'Homme et le Système qu'il cherche à maîtriser via le STI peut se décliner selon trois modes : délégation, substitution et médiation. La délégation consiste à confier au STI des tâches à faible niveau décisionnel généralement répétitives ou fastidieuses, le gain attendu est alors la fiabilité. La substitution met à profit la supériorité des capacités de calcul et de stockage de la machine en lui confiant la responsabilité de l'exécution de tâches réputées difficiles. Enfin, la médiation utilise le système comme un support de l'interaction collective pour exploiter la synergie entre un individu (ou une communauté) et le STI dans les tâches à plus haut niveau décisionnel non intégralement automatisables. Pour chaque mode, l'efficacité de la relation relève de trois perspectives d'analyse : la confiance que l'homme peut accorder au système, la performance que le système peut faire valoir, la qualité de l'interaction obtenue. Comment alors garantir cette efficacité et ainsi accompagner au mieux les multiples décisions que les équipes de conception, d'exploitation et de direction d'un système complexe rencontrent quotidiennement, du diagnostic de dysfonctionnements à la réorientation stratégique, l'optimisation de processus ou l'amélioration des performances. L'enjeu est d'autant plus stratégique lorsqu'il s'agit d'activités à risques (Hollnagel, Rigaud and Besnard, 2011).

Le concept d'automatisation cognitive

L'automatisation systématique (Thurman, Brann and Mitchell, 1997) et l'informatique pervasive (Piquard, 2003) posent cependant un certain nombre de problèmes (Hilty, Som and Köhler, 2004) ; (Kagal, Finin and Joshi, 2001) dont les prémices ont été signalées dès les années 80, du moins pour ce qui concerne les systèmes d'information et d'aide à la décision en salle de conduite de grands procédés (Bainbridge, 1983) ; (Bainbridge, 1991) ; (Montmain,

2000c) ; (Gentil and Montmain, 2005), et qui depuis ont dépassé le seul cadre de l'entreprise et sont plus que jamais d'actualité. L'automatisation des contrôles et de certaines actions (Després, 1991) peut être poussée jusqu'à l'«automatisation cognitive », c'est-à-dire le remplacement de l'opérateur pour certaines fonctions de décision. Or, si aujourd'hui on admet que, contre toute attente, l'introduction d'une automatisation de contrôle poussée a finalement rendu plus difficile la tâche des opérateurs parce que constituant un facteur de complexité supplémentaire dans la conduite d'une installation, on ne peut qu'avoir les mêmes craintes pour l'automatisation cognitive (Bainbridge, 1991).

C'est à la psychologie cognitive que l'on doit l'introduction de la notion d'automatisme cognitif. Nous nous référons largement à l'ouvrage de J.-L. Roulin à ce propos (Roulin, 2006). Roulin s'interroge entre autres sur le lien qu'il existe entre l'attention et l'apprentissage chez l'être humain : « D'un côté, il semble évident que plus l'attention est concentrée dans une acquisition (de connaissances), meilleure est celle-ci. De l'autre, il est tout aussi incontestable que nous sommes capables d'opérations précises sans avoir pour autant appris les règles théoriques correspondantes. Nous pouvons juger avec précision de l'endroit où une balle va entrer en contact avec le sol sans avoir jamais étudié les principes de la balistique. Nous disposons donc de savoir-faire qui n'ont pas fait l'objet d'un apprentissage conscient ni attentif ».

Dans la salle de conduite d'un grand procédé, le recours quasi continu à des savoir-faire précompilés chez les opérateurs peut nuire à la sûreté et la sécurité de l'installation. En effet, plus un système est automatisé, moins les opérateurs ont de décisions à prendre, de tâches à remplir, plus celles-ci relèvent d'une attitude passive. Par contre, dans les situations incidentelles, les opérateurs sont submergés par une avalanche d'informations portant sur des événements non désirés et à traiter dans l'urgence. La panique s'installe et retarde le nécessaire ajustement de représentation à la nouvelle situation de conduite et ses enjeux. Dans ce nouveau contexte de situation dégradée, l'opérateur devrait s'interroger sur la validité de ses automatismes si utiles en situation de routine ou de maîtrise, mais ce n'est clairement pas sa priorité de l'instant (Montmain, 2005). La situation de routine représentant à peu près 95% du temps de travail d'un opérateur de supervision, on peut donc penser que les tâches de l'opérateur de conduite relèvent pour l'essentiel d'automatismes. Constat qui peut paraître contradictoire avec la justification de la présence d'opérateurs humains sur certains procédés : en effet, dans l'industrie, l'homme est encore perçu comme le dernier maillon de la fiabilité, celui qui, lorsque l'imprévisible devient possible, a encore la capacité d'adapter la conduite à la situation dégradée. D'un côté, on ne peut pas attendre d'un opérateur que son attention soit maximale durant huit heures en continu, de l'autre côté une trop forte assistance informatique favorise la routine et l'inattention (Hoc, 1996). En principe, lors d'une situation incidentelle, l'homme doit en premier lieu se construire une nouvelle représentation pertinente de la situation, construction cognitive qui l'emmène bien loin de ses automatismes quotidiens (Montmain, 2000c). Un bon système d'aide à la décision devrait donc proposer une représentation adaptative adéquate de la situation pour permettre une meilleure interaction avec l'opérateur et ainsi optimiser la réponse de celui-ci en fonction de l'exigence effective de la tâche rapportée à l'effort fourni (Figure 0.1).

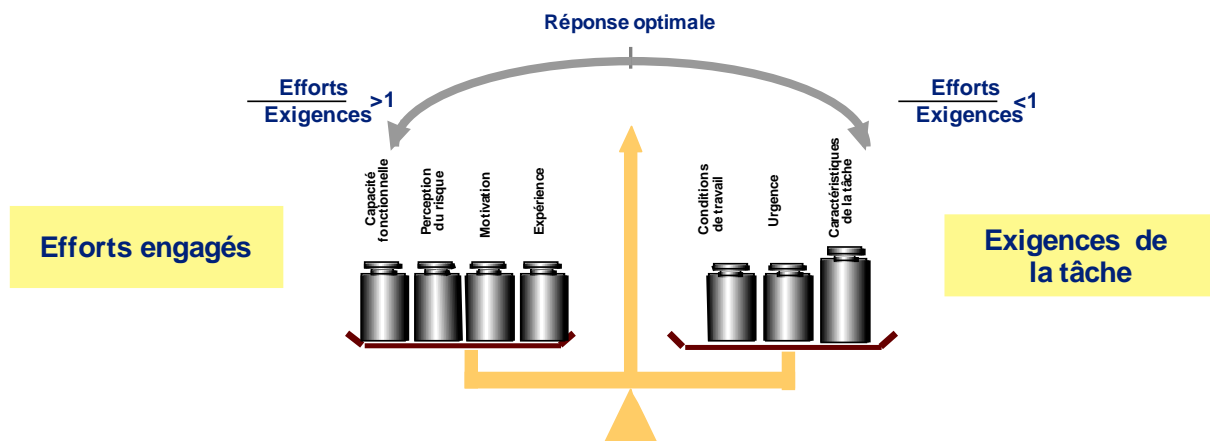


Figure 0.1: Un effort adapté aux exigences de la tâche

Attention et structuration des représentations mentales

L'aide à la décision que l'on peut apporter à un opérateur en salle de conduite est-elle la même selon que l'opérateur est un novice ou un chef de quart chevronné ? (Montmain, 2000b). Les représentations de l'installation et de sa conduite utilisées par le novice ou l'expert sont clairement distinctes. Comment ces savoirs et savoir-faire s'établissent-ils ? Les travaux d'Arthur Reber sur l'apprentissage des grammaires artificielles ont tenté de mettre en évidence la réalité d'un apprentissage non conscient. Toutefois, le contrôle systématique des diverses variables à l'œuvre dans cette situation expérimentale a permis de souligner le rôle des facteurs attentionnels dans cet apprentissage. Il est possible d'apprendre sans intention, mais certainement pas sans attention (Reber, 1969). Par ailleurs, les travaux de Nissen et (Nissen and Bullemer, 1987) confirment cette approche. L'attention intervient en quelque sorte pour formater la taille et le nombre de différents éléments réguliers susceptibles de constituer une expérience mentale. Elle détermine le nombre des événements indépendants pouvant se regrouper en une représentation cohérente de la situation, prédictive des événements et préparatoire à l'action. Si, d'une manière ou d'une autre, on empêche cette unité cognitive de se former, la performance s'en ressent (Roulin, 2006).

Ces résultats et ces analyses renforcent l'idée que l'attention joue un rôle dans la structuration de nos représentations mentales, à partir desquelles se construit notre expérience consciente. Il est donc essentiel que le système d'aide à la décision propose une représentation adaptative pertinente de la situation en fonction du contexte évolutif et interagisse au mieux avec l'opérateur afin de susciter son attention.

Toutefois, Roulin ajoute que l'étude des relations entre l'attention et l'apprentissage ne se réduit pas à ce dont nous pouvons ou non prendre conscience lors de l'acquisition. Une des vertus les plus importantes des processus d'apprentissage est de donner lieu à une certaine forme d'automatisation cognitive ou sensori-motrice, permettant à un grand nombre

d'opérations mentales ou de conduites de se dérouler apparemment sans contrôle conscient et sans effort attentionnel. Lorsqu'un geste sportif est maîtrisé, il est exécuté sans effort apparent et sans prendre conscience de la diversité des segments moteurs qui sont mis en jeu, même si chacun de ces segments a été l'objet d'un contrôle attentionnel particulier lors de l'apprentissage. Parfois même, le fait d'y faire attention bouleverse le déroulement de cet automatisme. Il semble ainsi nécessaire de distinguer les processus cognitifs qui sont à l'œuvre durant l'élaboration d'associations nouvelles de ceux qui interviennent durant l'activation d'une représentation déjà élaborée. Les processus élaboratifs interviennent dans la construction d'une représentation nouvelle réalisant une association d'informations différentes, c'est-à-dire une unité susceptible de donner lieu à une mémorisation à long terme (nouvelle compétence et nouveau savoir). Ils recourent à l'attention pour structurer les informations distinctes en un nouvel objet cognitif. Les processus activateurs interviennent dans la mobilisation cognitive d'une représentation déjà constituée (élaborée lors d'un apprentissage précédent). Parfois considérés comme automatiques, les processus d'activation sont beaucoup moins dépendants de variables stratégiques telles que l'attention et la conscience. Cela n'implique pas nécessairement que ces variables cessent de jouer un rôle. Un automatisme peut toujours être déclenché volontairement et interrompu délibérément. Il est toujours surveillé cognitivement. On prend généralement conscience des objectifs et des produits (conséquences ou résultats) d'une action, même si on ignore les mécanismes intimes et les étapes intermédiaires de son fonctionnement. Dans ces situations, au lieu de disparaître, l'attention est réorientée vers des objectifs différents. Le débutant qui essaie de maîtriser le geste de revers au tennis fait attention à la position de ses jambes, à la façon de tenir sa raquette, à l'armement préparé de son bras, à l'orientation de son buste, etc. Vraisemblablement, aucun effort attentionnel n'est consacré aux aspects stratégiques du jeu : renvoyer la balle à un endroit particulier du court pour mettre l'adversaire en difficulté au coup suivant. Ce qui change entre la performance du novice et celle de l'expert n'est pas la disparition de l'attention ou de la conscience, mais son déplacement d'une représentation à l'autre. Le novice se focalise sur les composantes fragmentaires et partielles des différents segments moteurs pour les intégrer en une forme motrice lissée et unique (le geste). L'expert se focalise sur les composantes stratégiques de la partie (gagner le point, le set, ou le match) en résolvant les problèmes posés par un adversaire animé des mêmes objectifs (Roulin, 2006).

Quelles aides à la décision ?

On peut ainsi considérer que chaque opérateur a acquis des savoir-faire qui lui apparaissent aujourd'hui comme des automatismes, des compétences compilées. En situation de routine, l'exploitation bénéficie largement des savoir-faire des opérateurs chevronnés. Par contre, en situation dégradée, il est difficile d'aborder la résolution collective de la crise par l'équipe de conduite sur la seule base de ces savoir-faire qui, par construction, ont peu de chance d'être communs à tous les opérateurs. Seules les connaissances déclaratives (des connaissances de génie des procédés, l'AMDE de l'installation, etc.), descriptives et indépendantes des usages

et assez éloignées de l'action concrète, peuvent être partagées et utilisées par le collectif d'opérateurs novices ou experts pour délibérer et décider sur l'urgence de la situation.

Le système d'aide à la décision doit donc favoriser la construction de ces représentations mentales dynamiquement afin qu'elles soient à la fois un support de raisonnement pour le novice ou l'expert, dans l'apprentissage comme dans l'urgence. Qui plus est, cette représentation mentale si elle est suggérée par, ou construite avec le système d'aide à la décision, se veut plus universelle, objective qu'une représentation issue de l'expérience individuelle et elle pourra ainsi constituer un référentiel partagé entre les autres opérateurs pour résoudre conjointement avec le système d'aide à la décision une situation de conduite complexe. Le système d'aide à la décision dispose alors de la même représentation de la situation de conduite que l'équipe d'exploitation, ce qui permet d'optimiser l'interaction entre l'homme et la machine pour résoudre la situation, instaurer un rapport de médiation efficace entre l'équipe de conduite et le système d'aide à la décision pour une meilleure résolution collective. Ce type de relations avec le système informatique nous semble être le plus pertinent pour gérer l'adéquation entre l'effort engagé par l'opérateur et l'exigence de la tâche : l'opérateur y trouve à la fois une aide cognitive qui assiste son raisonnement tout en favorisant son attention à travers l'interaction. L'interaction homme/machine doit donc s'articuler autour de représentations adéquates des problèmes de décision qui sont fonction de la complexité et de l'urgence de la situation. Le novice y trouve un support pour les activités cognitives qu'il acquiert, l'expert un écho cognitif qui l'assiste dans son raisonnement, le supplée dans le traitement de l'information et les tâches calculatoires.

Si l'homme est considéré comme une composante d'adaptation dans l'exploitation face aux perturbations extérieures, les études en fiabilité humaine ont montré que ses performances sont sujettes à d'importantes variations qui peuvent être à l'origine d'incidents. Pour prendre la mesure de ce risque, il faut considérer l'opérateur comme un facteur de risque par la variabilité de ses performances (Reason, 1993). La psychologie cognitive s'est encore penchée d'une part, sur la détection et l'élimination des erreurs humaines (Reason, 1993), sur les conditions d'apparition de ces erreurs d'autre part (Caverni, Fabre and Gonzalez, 1990). C'est justement en analysant ces erreurs humaines dans le cadre de l'activité générale de supervision, leurs manifestations et leurs conséquences, leurs liens avec les tâches confiées à l'équipe de conduite que l'on peut proposer des aides pertinentes pour la supervision (Benkhannouche, 1996) et plus généralement dans toute décision en rapport avec le management des activités à risques.

Objectifs des travaux

C'est sur la base de ce diagnostic que nous proposons d'étendre les principes des systèmes d'aide à la décision interactifs en situation d'exploitation de systèmes industriels à toute décision concernant un collectif d'acteurs responsable de la conception, de l'exploitation ou de l'évolution d'une activité à risques pour optimiser et fiabiliser les décisions de ce collectif. Si la thèse de (Planté, 2006) ; (Planté, 2010) a abordé l'automatisation cognitive en se

focalisant sur des tâches d'apprentissage, nous consacrons nos travaux à la décision collective qui, dans le cadre du management des activités à risques, est par nature multicritère et multi acteurs, comme il en sera discuté dans le chapitre qui suit. Nous proposons en premier lieu pour différentes situations de décision collective une représentation simple qui a pour objet d'être le support de la médiation entre l'homme et le système. Une fois, le modèle mathématique d'une situation établi, nous proposons d'identifier pour chaque situation la grandeur (incertitude, influence, enjeu et gain, etc.) qui permet de gérer au mieux la production de connaissances utiles à l'action afin que les caractéristiques du processus de décision en soient modifiées de façon pertinente (rapidité de convergence, fiabilité de la décision, complétude de l'évaluation, etc.). Autrement dit, nous mettons en place différents contrôles qui permettent un meilleur usage de la représentation formelle de la situation et qui, en interaction avec l'homme, garantissent une délibération plus efficace. La dynamique et la fiabilité de la phase de la délibération deviennent moins sensibles aux perturbations extérieures puisque la boucle de contrôle que nous proposons en limite les effets. Comme en automatique, nous proposons donc pour chaque situation d'abord un modèle mathématique du système à contrôler (le processus de décision délibérative), puis nous définissons un type de pilotage pour chaque situation qui a pour objet d'orchestrer la délibération et de contrôler la décision collective rendue plus fiable et plus efficiente.

Le management des activités à risques est typiquement un champ d'application privilégié car il fait l'objet de nombreuses prises de décisions critiques où se confrontent décideurs et opérationnels, experts et grand public, politiques et industriels, contraintes et enjeux, raison et pertinence sur un large panel de critères souvent conflictuels. L'automatisation cognitive doit contribuer à mieux contrôler la phase de délibération en favorisant l'échange d'informations, la construction et le partage de connaissances utiles à l'action, en limitant les effets de la rationalité limitée, processus intrinsèque à l'élaboration d'une décision d'organisation, en suscitant la justification et l'argumentation des solutions afin d'objectiver les propositions, en résolvant les problèmes d'optimisation locaux. Elle doit pallier ou du moins contrôler les déficits humains et organisationnels susceptibles d'affecter le bon déroulement de la phase de délibération afin d'améliorer un ou des aspects spécifiques du processus de décision (fiabilité, stabilité, consensus, etc.).

Plan du manuscrit

Le plan du manuscrit est le suivant. Un premier chapitre reprend en détail le rôle d'un système d'aide à la décision dans le cadre du management d'activités à risques. Les fonctionnalités du système sont spécifiées de sorte à minimiser l'impact des erreurs humaines et organisationnelles qui peuvent affecter le processus de décision collectif. Le système interactif d'aide à la décision doit être vu comme le médiateur entre l'homme et le système qu'il cherche à maîtriser : il doit l'aider à percevoir une situation critique, la comprendre, l'interpréter et la diagnostiquer avant d'y remédier, mais il doit également favoriser la résolution collective en constituant un support à la communication et à la coordination des intervenants. La décision est perçue comme un processus dynamique dont le temps de réponse

dépend de l'efficacité avec laquelle est menée la phase de délibération. Le chapitre 2 s'intéresse aux décisions collectives où un manager ou un stratège s'entoure d'experts pour prendre une décision sur la base d'un processus de fusion des avis exprimés. L'incertitude attachée à l'évaluation des alternatives est due d'une part, à l'imprécision des avis d'experts, aux divergences d'opinions d'autre part. Enfin, le contrôle de cette incertitude permet d'identifier les critères où sont exprimées de fortes divergences et d'orienter ainsi le débat d'experts sur des facteurs décisionnels majeurs. Le chapitre 3 introduit le concept d'influence dans un réseau social. Cette influence, au lieu d'être perçue comme une perturbation du processus de décision, est utilisée pour proposer deux modèles de pilotage de la phase de délibération d'une décision d'organisation. L'un s'appuie sur la délibération argumentée, l'autre sur des simulations stochastiques de l'issue de la délibération avec un formalisme d'équations d'état pour représenter l'évolution de la conviction des intervenants au fil du débat. Dans ce chapitre, les intervenants sont des agents, seul un pilote est distingué pour orchestrer le déroulement de la délibération. Le chapitre 4 met en scène des décisions collectives où se confrontent la vision stratégique des managers et la vision opérationnelle des exécutants. Le système d'aide à la décision tente de construire un consensus entre volonté et capacité. Lorsque des objectifs atteignables ont été élaborés, un modèle basé sur un problème de programmation par contraintes permet de calculer une mise en œuvre des actions pour les atteindre. Dans ce cas, le collectif est vu comme un ensemble d'agents collaboratifs et la délibération est pilotée par l'efficacité de la décision. Le chapitre 5 remet en cause cette vision idyllique de la décision collective et suggère un modèle basé sur la théorie de l'argumentation où se mêlent objectifs collectifs et enjeux individuels. Les mécanismes de la délibération proposés donnent une vision dynamique de la décision où s'illustre le principe de la rationalité limitée dans une décision d'organisation. Une conclusion et des perspectives achèvent ce manuscrit qui est illustré de plusieurs exemples relatifs au management d'activités à risques.

Chapitre 1.: Automatisation Cognitive et décisions collectives

1. Genèse du concept d'automatisation cognitive

La complexité des systèmes industriels et organisationnels dans lesquels l'homme est impliqué aujourd'hui conduit à l'émergence de systèmes dynamiques de traitement de l'information (STI) de plus en plus sophistiqués et incontournables. Ces STI ont pour objet d'assister l'homme dans la conception ou l'amélioration de systèmes complexes en particulier dans des situations industrielles dites « à risques », comme dans les domaines de l'énergie, des transports, de la défense, du spatial etc. (Montmain and Labreuche, 2009); (Sanchez, 2007) ; (Montmain, Sanchez and Vinches, 2009b). Cette assistance peut prendre la forme d'une aide au raisonnement, à la décision, mais dans certains cas le STI peut se substituer à l'homme parce que plus performant ou plus fiable sur des problèmes calculatoires, combinatoires, de gestion de mémoire ou de fiabilité, etc. (Sahraoui, 2009). La complexité des modèles supportant l'aide informatisée et la nature de la relation qui s'établit entre l'homme et la machine définissent le degré d'automatisation que procure le STI (Planté, 2010).

D'abord, cette évolution a été perçue dans les salles de conduite de grands procédés industriels, où le rôle de l'opérateur d'exploitation a évolué de la conduite à la supervision avec des tâches à plus haut niveau décisionnel, l'accent a essentiellement porté sur l'aide informatisée au raisonnement et à la prise de décisions adéquates lors de dysfonctionnements. L'introduction d'un système d'aide à l'exploitation dans le poste de conduite a forcément un impact sur la conduite (Montmain, 2000a). En effet, un opérateur chargé d'exploiter un procédé construit son action au travers des représentations construites par « l'artefact spécialisé », le « système de symboles physiques » généralement appelé poste de conduite (Montmain, 2000b). Cela explique le fait que tout projet visant à transformer ce poste, par exemple en y introduisant des fonctionnalités avancées, conduit inmanquablement à une évolution de la situation de conduite elle-même, l'opérateur s'adaptant « intelligemment » aux nouvelles représentations proposées (Montmain, 2005).

L'amélioration de la productivité passe par une automatisation de l'outil de production. Le premier gain à espérer est une amélioration de la qualité du produit ou à qualité égale, un gain économique. C'est la voie qui est adoptée dès les années 70. L'automatisation et l'informatisation apparaissent comme deux des plus importants facteurs de développement des grands procédés industriels continus. La part des calculateurs devient de plus en plus prépondérante et comprend l'acquisition des mesures, parfois combinée à des techniques de traitement du signal et la presque totalité des commandes, effectuées suivant des critères d'optimisation parfois complexes. Les calculateurs sont connus pour leurs capacités de précision, de mémorisation, de rapidité, de fidélité.

Sur ces quarante dernières années, l'automatisation de l'exploitation d'une installation complexe suit une démarche incrémentale :

- automatisation du procédé,
- conduite centralisée,
- aide à l'exploitation,
- aide au raisonnement.

L'étape suivante est le passage à la conduite centralisée. Le rôle de l'opérateur de conduite a continûment évolué de la conduite classique vers une activité de supervision nécessitant une compréhension poussée de l'outil de production. Dans cette tâche de supervision, l'outil de production est devenu indissociable de son système numérique de contrôle-commande (SNCC), rendant la compréhension des événements d'autant plus complexe. Le rôle de l'opérateur a évolué de la conduite à la supervision.

Actuellement, ce sont des opérateurs humains qui prennent en charge la surveillance de l'ensemble procédé/calculateur, afin d'agir lorsque les limites du domaine de validité des commandes sont atteintes ou lorsque des défaillances rendent impossible le comportement normal de l'installation. L'homme est supposé avoir pour principale qualité de savoir gérer l'imprévu et l'incertain, de créer des stratégies adaptées aux difficultés. Mais sa capacité évolue beaucoup dans le temps. En pratique, plus un système est automatisé, moins les opérateurs ont de tâches à remplir, plus celles-ci relèvent de la routine et d'une attitude passive. Par contre, dans les situations graves, une avalanche d'informations les submerge alors que les événements sont non désirés et à traiter dans l'urgence ; un effet de panique peut s'installer.

Dans un système complexe, il est impossible de tout anticiper et planifier. Compte tenu du coût de l'arrêt d'une grande installation, on comprend l'intérêt d'un « bon système de contrôle » : il y a plus d'avantages économiques à éviter un arrêt d'urgence qu'à gagner, avec une commande sophistiquée, quelques % en production ou sur l'énergie dépensée. Le concept d'automatisation évolue alors pour inclure la coordination d'autres objectifs que la conduite, dont la sécurité et la disponibilité de l'installation, le diagnostic en ligne et la maintenance selon état. La maîtrise de la disponibilité de l'installation via une supervision sophistiquée de celle-ci apparaît comme une seconde voie pour améliorer la productivité d'une installation et explique l'intérêt porté aux systèmes de supervision évolués depuis quelques années. La voie des systèmes d'aide à la décision pour les opérateurs de conduite constitue alors une troisième étape dans l'amélioration de l'exploitation de procédés complexes. Parallèlement à une automatisation poussée de l'outil de production, la supervision doit être considérée comme un autre axe pour améliorer la productivité d'une installation.

L'idée est de doter le poste de conduite d'indicateurs de plus en plus élaborés (indicateurs à usages multiples, de conduite générale). Ces indicateurs sont censés être utiles pour résoudre un problème de commande locale comme un problème d'incohérence au niveau de la gestion de production de l'atelier... Le risque encouru est l'inadéquation entre la quantité mais aussi la complexité des informations délivrées et le temps imparti à l'opérateur pour les analyser dans une situation dégradée.

La remarque qui s'impose après un examen des systèmes de supervision actuels est que l'opérateur dispose de beaucoup d'informations pour agir, mais n'est guidé dans sa prise de

décision finale par aucune analyse sur ces éléments et sur leurs relations. Les systèmes classiques sont capables de présenter un grand nombre de variables évoluant rapidement et c'est finalement ce qui pose problème. En effet, en face de cette avalanche d'informations, les limites de l'être humain apparaissent rapidement. Pour attirer leur attention sur des situations critiques, on élabore des alarmes, qui sont le plus souvent conçues comme de simples dépassements de seuils de tolérance, fixés de façon empirique par les ingénieurs de production. Les solutions actuelles pour alléger les tâches variées et complexes des opérateurs relèvent essentiellement de l'ergonomie des interfaces ; on réalise alors une meilleure présentation de nombreuses informations sophistiquées : c'est bien évidemment important mais insuffisant. Il faut concevoir des systèmes en ligne capables de gérer la combinatoire de ces informations, de les relier entre elles, de les filtrer et de les hiérarchiser, de les expliquer. Il s'agit de tâches à haute valeur cognitive où on attend de l'esprit humain raisonnements et décisions pour produire le diagnostic précis et exact et l'action corrective adéquate. Automatiser ces tâches c'est donc remettre en question la supériorité et la fiabilité de l'homme sur des tâches décisionnelles à haute valeur ajoutée cognitive, son irremplaçable capacité d'adaptation en situations complexes (Montmain, 2000a).

1.1 Conduite avancée ou aide à l'opérateur ? Quel degré d'automatisation ?

La question qui s'est rapidement posée a été de savoir quel était le degré d'automatisation qui devait être intégré dans le système informatique de supervision. S'agissait-il simplement d'intégrer des indicateurs en tant que données de base dans le poste de conduite afin que l'opérateur dispose d'une information optimale pour mener à bien son propre raisonnement de diagnostic ? Ou bien s'agissait-il plutôt d'intégrer les notions de vulnérabilité et de maintenabilité dans le raisonnement d'exploitation pour la production, d'automatiser les tâches de diagnostic et de pronostic, et donc de modifier à terme les règles d'exploitation ?

Dans le cas de la conduite d'un procédé industriel complexe, des équipes d'exploitation ont à maîtriser une installation fortement automatisée. Ce cas est représentatif d'un bon nombre de situations industrielles dites « à risques » dans différents domaines stratégiques. L'amélioration continue des performances rend l'exploitation de l'outil de production toujours plus complexe, les marges de conduite toujours plus restreintes. L'automatisation des contrôles et de certaines actions (Després, 1991) peut être poussée jusqu'à l'automatisation « cognitive », c'est-à-dire le remplacement de l'opérateur pour certaines fonctions de décision. « Si on reconnaît aujourd'hui de plus en plus clairement que, contrairement à ce qui était prévu, l'automatisation de contrôle peut rendre les tâches des opérateurs plus difficiles, la même chose peut être imaginée pour l'automatisation cognitive » (Bainbridge, 1991).

L'opérateur n'intervient plus alors que dans des situations non prévues à la conception du système automatisé, situations où l'imprévisible devient possible, auxquelles seule l'intelligence humaine peut éventuellement faire face. Dans cette hypothèse, les automatismes « rendent la main » quand le processus est dégradé et seules les fonctions de sûreté restent assurées. Les opérateurs ont alors à récupérer la situation, en tenant compte non seulement du

fonctionnement de l'installation, mais aussi des décisions prises par les automatismes, ce qui complique leur tâche. Bainbridge a qualifié ce phénomène de paradoxe de l'automatisation.

Ajoutons que l'automatisation des tâches de supervision, de surveillance et de diagnostic est encore compliquée par la dimension collective de la conduite de systèmes industriels complexes. Dans ces contextes automatisés, et en mode dégradé, les prescriptions comportent un haut niveau d'implicite, ce qui mène les opérateurs à confronter leurs points de vue et donc à construire un référentiel opératif commun (De Terssac and Chabaud, 1990). La complexité de la situation n'a plus seulement une dimension cognitive, mais aussi collective. Dans ces conditions, il devient très délicat d'introduire dans l'équipe de conduite les agents artificiels, que sont les systèmes d'aide à l'exploitation, qui siéent à chacun tout en servant une résolution collective des problèmes (Taborin, 1989) ; (Milot, 1988).

1.2 La situation de conduite

Les décisions d'intervention sur la situation dépendent du sens (connaissances opérationnalisées) et de la valeur (appréciation de l'utilité des informations) que l'observateur accorde aux phénomènes perçus. Dans ces conditions, il s'agit moins d'expliquer la situation en recherchant des relations de cause à effet que de la « recadrer », c'est-à-dire en construire une représentation qui convienne à l'action.

L'objet de la supervision ne doit pas seulement être le fonctionnement du procédé physique, mais le système que constitue l'outil de production conduit par une équipe d'exploitation. Pour intervenir au niveau de réalité choisi, la situation doit prendre forme et prendre sens au travers de représentations, pour l'observateur confronté à des difficultés de compréhension, d'anticipation ou de maîtrise. L'aide à la décision doit reposer sur des représentations adéquates à l'activité de surveillance et de diagnostic (Celse, Gentil and Montmain, 2007) ; (Gentil, Montmain and Combastel, 2004) ; (Evsukoff, Gentil and Montmain, 2000) ; (Montmain and Gentil, 2000). En fait, on peut considérer que l'observateur se met lui-même en scène dans une situation de confrontation à un objet de connaissance (la situation de conduite) dont il construit une représentation qui convienne à son projet d'intervention (Gentil and Montmain, 2005). Essayant d'agir à distance d'un lieu où il ne se trouve pas, l'observateur est dans une situation à la fois d'action dynamique, de conception et de prise de décision (Penalva, 1997). Surveiller une installation conduite par une équipe d'exploitation définit une situation complexe qu'un observateur, opérateur ou système de supervision, cherche à diagnostiquer (Montmain, 2000c).

Une aide à la décision en salle de conduite nécessite donc que l'on dispose à la fois d'un modèle de référence du système industriel (Cordier et al., 2004) ; (Cauvin et al., 1998), mais aussi de la stratégie en termes de contraintes et d'objectifs de l'exploitant si l'on veut régir au mieux les interactions entre l'homme et la machine pour gérer au mieux la situation complexe de conduite (Montmain, 2000a). C'est l'optimisation de cette résolution conjointe qui laisse espérer la meilleure *adaptativité* de l'exploitant face à des événements redoutés et inconnus. Ce n'est ni l'abondance d'indicateurs sophistiqués basée sur des systèmes informatiques toujours plus performants, ni les outils et méthodes de diagnostic issus de la recherche en

automatique et qui visent à éliminer purement et simplement l'opérateur de la salle de conduite, qui permettent de définir l'aide à la décision idéale (Montmain, 2005). L'automatique et l'intelligence artificielle ont tenté dès le milieu des années 80 de fournir des outils plus adaptés pour résoudre cette situation complexe : l'automatique a produit des représentations mathématiques dédiées au diagnostic de systèmes industriels, l'intelligence artificielle (IA) nous a livré les fondements logiques de la théorie du diagnostic. Cette aide à la décision doit être fonction de la situation de conduite, de l'attitude adoptée par l'exploitant face aux risques encourus comme nous l'illustrerons plus loin.

La supervision en salle de conduite, comme la sécurité industrielle, n'est qu'une facette de la problématique plus générale de la maîtrise des risques ou le management des activités à risques. L'intervention en situation complexe ne comporte-t-elle pas toujours une part de risques ? En effet, une autre façon d'introduire la notion de risque dans l'action est de souligner que la maîtrise des systèmes complexes passe par l'acceptation d'un contrôle incomplet (Mélèse, 1991). L'amélioration continue des performances de l'entreprise conduit nécessairement à la prise de risques au sens général du terme. La maîtrise est prise comme un état opposable à celui de crise, sans en être son contraire, qui serait la routine (Latour, 1994). L'aide à la décision en situation complexe revêt également une dimension collective : le collectif d'acteurs en charge de la situation complexe doit en partager une représentation commune qui est utilisée comme vecteur ou support par le collectif pour élaborer un diagnostic, évaluer les solutions d'intervention et les argumenter. Les décisions qui concernent la conduite stratégique de l'entreprise concernent généralement un nombre conséquent d'acteurs et de partis ; qui plus est, leur caractère stratégique nécessite que l'on en rende compte à des partenaires sociaux, économiques ou politiques extérieurs à l'entreprise. Définir une représentation en adéquation avec les modes de raisonnement des acteurs de la décision n'est pas chose simple, mais que cette représentation soit interprétable et objective pour un collectif d'acteurs constitue encore un autre challenge. La représentation doit alors avoir valeur de médiation.

Si l'on considère la contribution de l'automatique et de l'intelligence artificielle à l'aide à la décision en salle de conduite, on ne peut qu'amèrement constater que le nombre d'applications industrielles n'est pas à la hauteur des résultats scientifiques de ces deux disciplines... Une explication de cet échec réside vraisemblablement dans le trop peu d'attention accordée à la relation qui doit s'établir entre l'homme et l'outil informatique pour la résolution collective de problèmes. Le partage des tâches entre l'homme et la machine au plus haut niveau décisionnel reste un sujet bien délicat. L'informatisation des contrôles et de certaines actions, poussée jusqu'à l'automatisation cognitive totale, c'est-à-dire le remplacement de l'homme pour certaines fonctions de décision, explique, par exemple, le rejet total des premiers systèmes experts des années 80 par les opérateurs en salle de conduite, persuadés que l'informatique les déposséderait de leur travail.

Le degré d'informatisation d'une tâche dépend du niveau de formalisation de celle-ci. Sur les tâches à plus haut niveau cognitif, autrement dit les moins formalisables, l'homme ne saurait donc être remplacé, mais simplement accompagner dans son raisonnement, la résolution du problème est alors fonction de la coopération homme/machine. Dans l'industrie, l'homme est

encore perçu comme le dernier maillon de la fiabilité (nous reviendrons sur ce point). Les avions sans pilotes et les centrales nucléaires sans opérateurs ne sont pas pour demain. Dans ce cas, l'automatisation cognitive doit s'apparenter à un support méthodologique, calculatoire ou décisionnel interactif, qui favorise le raisonnement. Le succès d'un STI dans l'industrie passe souvent par une conception de l'outil informatique qui prenne en compte de façon explicite la relation homme/machine qui devra s'instaurer en fonction du degré de formalisation des problèmes à résoudre et de la nature de la situation.

1.3 Automatisation cognitive et informatique décisionnelle

A l'ère du web, il va de soi que les systèmes d'information ont largement dépassé le cadre de la salle de conduite, et même de l'entreprise et qu'ils sont aujourd'hui en passe de modifier le fonctionnement de nos organisations voire de nos sociétés. Le traitement de l'information est vite devenu un enjeu majeur et le web n'en est que la face la plus visible. Le web usage mining et le web content mining nous accompagnent (ou nous analysent) jusque dans nos achats sur la toile... procède-t-on encore à un achat sans consulter l'avis d'internautes ayant déjà effectué cet achat ou partageant avec nous un certain nombre de centres d'intérêt ? Toute décision insignifiante comme stratégique, individuelle ou collective semblerait aujourd'hui être réduite à un seul problème de traitement de l'information (Plantié, 2010).

Avec le World Wide Web, les problématiques de la surcharge cognitive et de l'automatisation cognitive se sont invitées dans tous les secteurs économiques. La société de l'information a également infiltré nos foyers. De nos jours l'explosion des technologies de l'information a fait de l'Internet un outil, incontournable tant au niveau personnel que professionnel occupant une place prépondérante dans notre société et notre vie. Le WWW nous offre un monde de l'information prodigieux sans limite, ce qui pourrait apparaître comme une véritable opportunité, mais d'un autre côté, c'est l'ouverture à un monde inexplorable et incontrôlable en termes de quantité et de fiabilité des informations délivrées, où l'ensemble des choix possibles est quasi infini... Le problème pour le décideur—au sens commun du terme—en quête de l'« information pertinente » n'est plus l'accès à cette information qui tend à être uniformément distribuée, mais de savoir la trouver dans d'imposants flux informationnels extrêmement « bruités ». S'aventurer dans le monde de l'information sur des sujets, où ses connaissances sont limitées, est un pari risqué. Pourquoi prendre pour argent comptant, une information scientifique qui est passée à travers tout processus de vérification et de validation et cela, qui plus est, en toute légitimité ? Quelle valeur accorder à l'analyse, l'interprétation par un site marchand de telle ou telle caractéristique d'un produit ? Tout est sur la toile, mais à chacun de savoir consulter et de se faire son opinion. Qu'est-ce que dans ce cadre que l'informatique décisionnelle ? Si la problématique de la surcharge cognitive est évidente dans le contexte du web, on comprend aisément que, comme il l'a été constaté dans l'industrie il y a maintenant plus de 25 ans, l'informatisation des connaissances ou l'automatisation cognitive aveugle pourrait nous offrir des services à la pertinence illusoire si on ne développe pas les méthodes et outils capables de cadrer les usages et garantir des filtres de l'information fiables et intelligents (à titre

d'exemple, aujourd'hui encore, la recherche d'information est syntaxique et non pas sémantique, l'adéquation requête/proposition d'un moteur de recherche repose sur la seule statistique de fréquences d'occurrence de mots rarement lemmatisés et non pas sur les notions plus évoluées de sèmes et de morphosyntaxe). Le filtrage intelligent de l'information, la recherche d'information sémantique ou décisionnelle doivent être les nouveaux challenges d'une automatisation toujours plus cognitive.

H.A. Simon, qui a élaboré la théorie économique de la rationalité limitée, présentée en 1947, dans *Administration et processus de décision* (Simon, 1983), précise déjà que la difficulté dans un processus de décision consiste à traiter l'information entre autre parce qu'elle est trop abondante. Pour cela, il met en avant les outils informatiques, qu'il appelle des « prothèses de l'homme » au sens où ils aident ce dernier à poser plus rationnellement les problèmes, filtrer les informations et simuler et planifier l'action qui devra suivre (Simon, 1980). Il édicte alors quelques principes pour la conception de ces outils et précise que l'essentiel est de comprendre la manière dont les décisions sont prises dans l'organisation, soulever les questions auxquelles l'information va répondre, adopter une approche arborescente et modulaire des problèmes. Dans le cadre de la décision organisationnelle, le vocable « système de traitement de l'information » (STI) permet de désigner commodément la lignée des modèles issus de la pensée de H.A.Simon (Simon, 1991a) ; (Simon, 1997).

Prise au pied de la lettre, cette approche des systèmes d'information comme prothèses de l'homme conduit aujourd'hui à la naissance d'une « informatique décisionnelle », dont le mot d'ordre principal est : « fournir à tout utilisateur reconnu et autorisé, les informations nécessaires à son travail ». Ce slogan fait naître une nouvelle informatique, intégrante, orientée vers les utilisateurs et les centres de décision des organisations. Tout utilisateur de l'entreprise ayant à prendre des décisions doit pouvoir accéder en temps réel aux données de l'entreprise, doit pouvoir traiter ces données, extraire l'information pertinente de ces données pour prendre les meilleures décisions (Sanchez et al., 2009).

Le système d'information n'assiste donc plus seulement les décisions en salle de conduite, mais il régit maintenant toutes les connaissances utiles aux décisions d'organisation à des niveaux plus stratégiques de l'entreprise. La question que l'on doit se poser plus que jamais est : jusqu'où peut-on pousser l'informatisation d'un processus décisionnel ? Nous étendrons donc le concept d'automatisation cognitive tel qu'il a été introduit par Bainbridge en 1991 à tout processus décisionnel dans l'organisation impliquant un collectif d'acteurs. Nous le préférons à celui d'informatisation des connaissances de Simon, parce que la cybernétique est somme toute l'un des grands courants de pensée qui ait marqué les sciences de la décision tout de suite après la seconde guerre mondiale. Et notre objectif est bien d'avoir recours à des modèles mathématiques qui permettent de piloter et pas seulement d'informatiser le processus de décision. L'idée est de chercher le niveau d'automatisation le plus adéquat pour une situation de décision donnée afin de fiabiliser la décision, d'en accélérer le processus, d'en dégager les consensus optimaux. Ce niveau d'automatisation sera fonction du degré de formalisation mathématique de la situation de décision, mais aussi de la nature de la situation et de la qualité du recueil de la stratégie décisionnelle exprimée.

2. Quelles activités cognitives automatiser ?

2.1 Les activités cognitives

D'un point de vue très général, on peut considérer que l'automatisation cognitive consiste à élaborer des modèles pour aider l'opérateur humain—au sens large du terme—à comprendre, décider et agir dans des situations complexes faisant appel à ses capacités cognitives. Plus la représentation de la situation est formalisable, plus le degré d'automatisation sera fort. En effet, comme en automatique classique, plus les équations d'état d'un système technique sont connues précisément, plus le contrôle du système offre de possibilités. Ces modèles constituent le cœur de procédures de traitement de l'information qui supportent le raisonnement et la compréhension en situation complexe afin que l'opérateur humain puisse agir de la façon la plus pertinente qui soit au vu des informations dont il dispose à un instant donné. Il est désormais convenu de parler de système d'*aide à la décision* dans la littérature comme dans le monde industriel, *système de décision* serait inconvenant. Pourtant, on peut se demander pourquoi considérer l'outil informatique comme un simple suppléant si ses conclusions sont le résultat interprété de savoirs compilés... Quand peut-on penser qu'il y a automatisation cognitive plutôt qu'aide ou assistance ? Tout dépend de ce que l'on entend par cognition (et par là, on rejoint le concept d'automatisation cognitive, mais au sens primitif des psychologues cognitivistes)...

Selon (Rasmussen et al., 1981), trois types de comportements peuvent relever de la cognition : le comportement basé sur les automatismes noté SB (Skill Behavior), le comportement basé sur les règles noté RB (Rule Behavior) et le comportement basé sur les connaissances déclaratives¹ noté KB (Knowledge Behavior). Généralement, on conviendra que le comportement SB est celui qui est prioritairement sollicité dans une tâche, puis le comportement RB dès la détection d'un problème dans l'exécution, puis le comportement KB si le problème n'est toujours pas résolu (Figure 1.1). Les erreurs humaines associées au comportement SB sont dues à des actions non conscientes (les lapsus et les ratés), tandis que les erreurs associées aux comportements RB et KB sont dues à des actions délibérées (les fautes). Nous reviendrons plus loin sur une typologie de ces erreurs. L'automatisation cognitive doit donc contribuer à fiabiliser ces comportements (comme l'automatique à contribuer à concevoir des systèmes plus sûrs, des niveaux de qualité moins incertains). Sous cette acceptation large de la cognition, l'automatisation cognitive est l'ensemble des procédures de traitement de l'information dont l'objectif est l'informatisation des connaissances, des savoir-faire et agir, afin de faciliter l'action de l'homme, de la rendre plus fiable et plus performante, sans pour autant privilégier une relation de substitution ou de délégation totale entre l'homme et la machine en situation complexe.

¹ Les connaissances déclaratives portent sur des propriétés et des relations qui requièrent un travail approfondi de mise en œuvre pour se traduire en termes d'action concrète. Elles sont descriptives et indépendantes des usages et assez éloignées de l'action concrète.

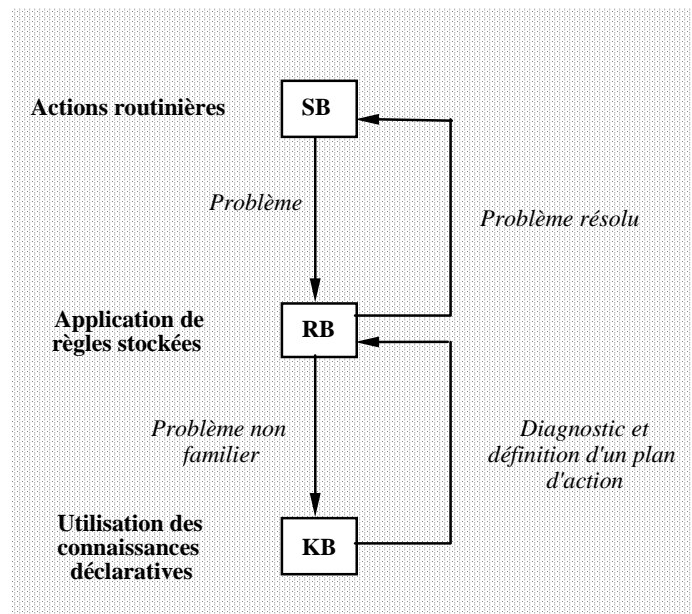


Figure 1.1 : Schéma de principe du modèle de Rasmussen

Doit-on parler pour autant d'automatisation cognitive dès qu'un algorithme ou un automate suffit à remplacer l'homme localement, ponctuellement, sur une tâche immuable et bien spécifiée ? S'il n'y a aucune dynamique dans l'action, si l'homme n'est pas confronté à choisir dans l'incertitude, à adapter son action en fonction de la réaction du système sur lequel il cherche à agir, à anticiper face à un environnement ouvert, il nous semble qu'il s'agit là d'automatisation, mais pas d'automatisation cognitive, de calcul et non pas de décision, d'efficacité et pas de prise de risques. L'automatisation cognitive nous semble désigner l'informatisation de comportements de type KB, autrement dit elle serait réservée aux tâches exigeant que l'on s'appuie sur des modèles de connaissances décrivant au moins partiellement la situation à laquelle l'homme est confronté.

Revenons sur l'idée de savoirs compilés. L'automatisation cognitive signifie-t-elle reproduire le raisonnement de l'homme pour l'automatiser ? Doit-on avoir les mêmes ambitions que les théories de la décision de la fin des années 40 ou de l'intelligence artificielle au début des années 80 ? Toute notre cellule cartésienne de la décision est fondée sur le principe *faire aussi bien que la nature* laquelle serait logique, rationnelle et déductive. Dans les années 50, la recherche opérationnelle, la théorie des jeux, les calculs statistiques rentraient dans cette démarche idéale. Cependant dans la réalité quotidienne, on utilise rarement de telles procédures. D'abord, il faut remettre en cause l'idée selon laquelle la décision est une réponse précise à un problème donné, prédéfini. La décision est un processus où problème et réponse se construisent en même temps (Simon, 1991a) ; (Simon, 1997) ; (March, 1988) ; (March, 1991). Ensuite, la psychologie cognitive envisage la décision comme un cas particulier des stratégies de résolution de problèmes (Kahneman, Slovic and Tversky, 1982). Elle explore des rationalités subjectives employées par les individus en situation. Beaucoup d'expériences concernent les biais cognitifs, c'est-à-dire les raisonnements en apparence corrects qui conduisent à de fausses conclusions. Heureusement, les heuristiques, c'est-à-dire les méthodes de résolution de problèmes approximatives, employées dans la vie courante sont

souvent fiables (Planté, 2010). Les biais mis en évidence par la psychologie cognitive attestent que le décideur ne fonctionne pas selon les principes des théories formelles. Les explications fournies sur les processus en œuvre dans la décision sont encore limitées : perception sélective, traitement séquentiel, capacités de calcul et de mémorisation limitées, sensibilité aux caractéristiques de la tâche, action sur l'environnement... Au lieu d'être algorithmique l'activité mentale du décideur serait heuristique : les procédures mises en œuvre seraient habituellement efficaces, mais n'auraient pas de justifications rigoureuses (Caverni, Fabre and Gonzalez, 1990).

L'objectif des théories mathématiques de la décision était initialement d'expliquer comment un homme rationnel doit prendre des décisions dans l'incertitude. Le décideur construit un arbre de décision pour projeter les conséquences des différents choix possibles quant à la probabilité et à l'utilité des événements correspondants ; il décide entre les choix selon une règle de maximisation de la valeur espérée ou de l'utilité attendue. Cette première orientation s'est révélée incapable de prédire les décisions effectivement prises par des individus et donc a fortiori de décrire les processus mentaux qu'ils mettent en œuvre pour décider. On a expliqué cette incapacité par le fait que, d'une part le système humain de traitement de l'information est limité, d'autre part l'individu n'estime pas et ne traite pas les probabilités selon les principes des théories probabilistes. Pour la plupart des problèmes de la vie quotidienne, nous mettons en œuvre des heuristiques, c'est-à-dire des raisonnements plausibles, mais non certains (des inférences plutôt que des déductions). Parfois même, il arrive qu'une démarche de la pensée viole les principes de la logique déductive formelle et soit pourtant efficace. On peut donc imaginer abandonner le concept de stratégie optimale. Premièrement, il est très rare que nous soyons dans une telle situation avec un seul critère. Et à supposer que l'on soit dans une telle situation, on a rarement la capacité cognitive de traiter les milliards d'informations et de solutions possibles. Le choix rationnel suppose la connaissance, l'examen et l'évaluation de toutes les options possibles, de tous les états de la nature actuels et futurs, des différentes issues possibles. Une fois tous ces aspects estimés sur plusieurs dimensions, il reste à faire la sélection présentant l'utilité maximale... Un tel processus requiert à la fois une grande disponibilité d'informations et une grande capacité de calcul. Notons encore que la notion même d'utilité maximale peut être remise en cause : qu'est-ce que l'utilité maximale quand il s'agit de la définir pour un collectif d'acteurs aux points de vue divergents ? Notons que les propriétés essentielles de l'activité mentale dans la décision ont été inférées à partir d'un inventaire des principaux biais cognitifs ! Les biais que subit le décideur sont de quatre types : l'acquisition de l'information, le traitement de l'information, l'expression de la réponse, l'information qu'il reçoit en retour.

Intégrer d'autres formes de rationalités que la rationalité déductive, modéliser des rationalités subjectives, procédurales, inférentielles, introduire des heuristiques dans la résolution de problèmes, utiliser un modèle mathématique pour supporter un processus de médiation entre les parties prenantes de la décision, sont les challenges scientifiques de l'automatisation cognitive. Développer les capacités de calcul et de traitement de l'information nécessaires à la résolution de problèmes complexes par un collectif d'acteurs aux intérêts divergents voire conflictuels est un enjeu qui coïncide avec les conclusions de la psychologie cognitive et la

vision de l'informatique décisionnelle de l'économiste Simon. Une fois ces processus identifiés, encore faut-il définir l'intervention de l'outil informatique dans leur automatisation.

2.2 Performances attendues de la relation homme/machine

Ces quelques pages ont pour objet de montrer combien l'enjeu de l'informatisation des connaissances ou de l'automatisation cognitive est un challenge d'actualité. Nous avons précisé que nous parlerons d'automatisation cognitive dès lors qu'il s'agit d'informatiser une tâche dont le contexte dynamique peut être au moins partiellement modélisé formellement. La relation complexe qui s'instaure entre l'homme et le « système » qu'il cherche à maîtriser via le STI est alors fonction du niveau de formalisation du problème à résoudre et peut se décliner selon trois modes : la délégation, la substitution et la médiation.

- La délégation consiste à confier au STI des tâches à faible niveau décisionnel dont le caractère répétitif ou fastidieux fait l'objet de nombreuses erreurs humaines, le gain attendu est alors la fiabilité ;
- La substitution met à profit la supériorité des capacités de calcul et de stockage de la machine en lui confiant la responsabilité de l'exécution de tâches réputées difficiles ;
- Enfin, la médiation utilise le système comme un support de l'interaction collective (à minima le couple homme/machine) pour exploiter la synergie entre un individu (ou une communauté) et le STI dans les tâches à plus haut niveau décisionnel non intégralement automatisables.

Pour chaque mode, l'efficacité de la relation relève de trois perspectives d'analyse qui sont respectivement : la confiance que l'homme peut accorder au système pour la relation de délégation, la performance que le système peut faire valoir pour la relation de substitution, la qualité de l'interaction obtenue pour la médiation.

L'émergence de la décision comme domaine d'étude scientifique remonte aux années 1943 et 1948, moments où apparaissent plusieurs courants de recherche parallèles dont la cybernétique comme science de la communication et de la commande dans les systèmes naturels et artificiels créée par Wiener en 1948 et vite associée aux problématiques de la recherche opérationnelle. La nature des processus décisionnels conduit à considérer différentes stratégies selon que le choix de l'action repose :

- sur la résolution d'un problème dont la représentation formelle peut être délicate ; lorsqu'elle est mathématique ou logique, la résolution peut prendre la forme d'un problème de recherche opérationnelle ;
- sur la recherche de compromis entre différents points de vue et stratégies, la décision est alors non-programmable et le processus devient la recherche d'une procédure acceptable de traitement de l'information. Les outils du multicritère et du traitement de l'information permettent d'appréhender formellement la confrontation de divers points de vue, différentes perspectives d'analyse ;

- ou encore sur l'interaction entre des groupes aux intérêts divergents (décision non structurée) ; le problème décisionnel se développe par un exercice d'adaptation de l'organisation. Il s'agit là de construire un processus dans lequel tous les acteurs puissent être capables de contribuer à une action collective qui fasse sens individuellement et collectivement. Les approches agents fournissent des outils intéressants dans ce cas que ce soit en termes de protocole ou de négociation. Les Sciences Humaines et Sociales (March, 1991) ont ouvert de nouvelles perspectives.

L'étude de ces différents processus de décision et d'action doit conduire à proposer des outils et méthodes destinés à aider l'homme à conduire son action c'est-à-dire une ingénierie de la décision et de l'action avec un degré d'automatisation plus ou moins marqué selon que le modèle est complètement mathématisable (ROP, Théorie des jeux, etc.), partiellement mathématisable (Théories de l'incertain, Théorie de l'Utilité Multi Attributs, Raisonnement Approximatif, etc.) ou pas (Systèmes Multi-Agents, Théorie de l'Argumentation, etc.). On se placera donc ici principalement dans une relation de médiation entre un collectif d'acteurs et leur STI sans pour autant renoncer à la délégation ou à la substitution lorsqu'une partie du processus de décision le permet, et le résultat escompté se mesurera au niveau de l'efficacité et de la fiabilité du système homme/machine dans la résolution de problèmes.

A l'heure où le traitement de l'information s'est introduit dans l'entreprise comme dans nos modes de culture, où les sections CNU 61-Génie informatique, automatique et traitement du signal et 27-Informatique ont bien du mal à se démarquer l'une de l'autre, le problème de l'automatisation cognitive apparaît comme un enjeu fort de notre société de l'information. Nous pensons que les tâches qui nécessitent l'emploi d'un modèle plus ou moins complexe, sur la base duquel l'homme va construire un raisonnement pour agir, relèvent de l'automatisation cognitive. L'objet de cette dernière ne doit pas être de reproduire systématiquement le raisonnement humain—l'homme étant lui-même susceptible de défaillance au sens fiabiliste du terme, mais d'augmenter le niveau d'interaction et de coopération homme/machine pour une résolution de problèmes complexes non totalement automatisables plus fiable, plus performante, en utilisant les fortes capacités de traitement de l'information, calculatoires et de mémoire de la machine, les heuristiques et l'adaptabilité de l'homme.

3. Fiabilité humaine et aide à la décision

Pour qu'il y ait vraiment une résolution collective d'une situation de décision par le couple homme/machine, il est nécessaire que la méthodologie de conception du système d'aide à la décision tienne compte de l'aspect de coopération avec l'homme et intègre une analyse des activités de celui-ci tout au long du processus décisionnel. Si l'individu peut être considéré comme une composante d'adaptation et de réactivité de l'organisation face aux événements ou perturbations internes et externes à celle-ci, d'un autre côté, ses performances sont sujettes à d'importantes variations, qui peuvent avoir une incidence sur la situation et remettre en cause la mission qui lui a été confiée. Pour prendre la mesure de ce risque, il faut considérer

les acteurs d'un processus décisionnel comme des facteurs de risque par la variabilité de leurs performances. Cette variabilité est à l'origine de la défaillance (inaptitude à assurer une fonction requise), qui peut conduire à l'erreur humaine (les actions effectives ne correspondent pas aux intentions) (Benkhannouche, 1996) ; (Reason, 1993). C'est justement en analysant ces erreurs humaines dans le cadre de l'activité de la décision, leurs manifestations et leurs conséquences, leurs liens avec les tâches confiées au décideur que l'on peut proposer des aides pertinentes pour l'aide à la décision.

Citons le schéma linéaire en cinq étapes d'un processus de décision dont Sfez dénonce le caractère simpliste (Sfez, 1992) pour illustrer nos propos. Les cinq phases mentionnées y sont la formulation d'un désir et conception d'un projet y répondant, la prise d'information, la délibération, la décision proprement dite et l'exécution.

L'absence d'une ou plusieurs de ces phases correspond à une déviation que l'on peut étiqueter :

- s'il manque l'exécution, on parlera de velléité ;
- si l'on passe directement de la conception à la décision, on parlera d'impulsivité ou d'instinct ;
- si l'on ne saute que la prise d'informations, on parlera de paresse, de manque de rigueur ;
- si l'on saute la délibération, on parlera de légèreté ou de précipitation ;
- si l'on s'arrête à la délibération, il s'agira plutôt d'intellectualisme.

Si la déviation n'est pas intentionnelle, alors il s'agit d'une défaillance humaine individuelle ou collective selon le cas qui peut conduire à l'erreur malheureuse, la mauvaise décision, l'action manquée.

3.1 L'erreur humaine

L'erreur est plus particulièrement l'objet d'étude de la fiabilité humaine, préoccupation qui remonte aux années soixante et qui visait à déterminer les risques liés aux erreurs humaines dans des activités telles que la conduite d'installations industrielles. La fiabilité humaine est à présent devenue la science des défaillances humaines (Villemeur, 1988), dont l'objet est de prédire et de prévenir l'erreur humaine dans le but d'optimiser la fiabilité globale et la productivité du processus que l'homme cherche à contrôler. Ces études sont classiquement le fruit d'analyses fiabilistes dédiées à la conduite de processus industriels. Nous pensons que la plupart de ces erreurs sont transposables dans le contexte de l'automatisation cognitive. Aujourd'hui, les méthodes d'organisation, d'optimisation ou de formalisation qui ont fait leurs preuves dans l'industrie sont en passe d'être transposées à des secteurs tertiaires, économiques. Ne parle-t-on pas déjà d'une industrialisation de la médecine ou de l'hôpital ? (Aloui, 2007). Si l'automatisation de tâches cognitives a pour objectif de rendre la décision d'un collectif d'acteurs confronté à une situation complexe plus fiable et plus performante alors les résultats de la fiabilité humaine méritent que l'on s'attarde quelque peu sur le concept d'erreur humaine et que la transposition de ces résultats à l'activité d'un collectif

d'acteurs confronté à une décision complexe soit intégrée dans la conception de nos Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision de Groupe (SIADG). Nous considérerons alors que la décision est un ensemble de processus cognitifs—apprentissage, délibération, argumentation, sélection—, leur conduite relève d'une activité managériale. Ainsi, plus qu'au processus lui-même, ce manuscrit s'intéresse au pilotage du processus de décision.

En conduite d'ateliers, aborder l'étude de l'erreur humaine s'avère délicat, car l'analyse de l'erreur peut conduire à des interprétations divergentes selon que l'on considère les écarts par rapport à la tâche telle que la définit le prescripteur, par rapport à la tâche telle que la redéfinit l'opérateur, ou encore par rapport à l'activité réelle de l'opérateur (Cellier, 1990). En effet, l'écart à la prescription n'est pas nécessairement à interpréter en terme d'erreur, à forte connotation négative ; elle peut être également bénéfique pour le processus, par la capacité de l'homme à produire des comportements qui favorisent une «récupération innovante mais efficace » (Poyet, 1990). Par ailleurs, l'erreur humaine ne peut être réduite à une activité individuelle isolée, elle est la combinaison de facteurs à la fois internes et externes (conditions techniques et sociologiques, contexte).

La fiabilité humaine, en tant que discipline de l'ergonomie, s'intéresse aux conditions d'apparition de l'erreur et aux moyens de les prévenir ; la psychologie cognitive s'intéresse plus particulièrement aux mécanismes cognitifs de l'erreur. La première discipline s'intéresse davantage à des indices, des traces de l'erreur ainsi qu'aux moyens d'y remédier, tandis que la seconde vise à en comprendre et en expliquer la genèse (Caverni, Fabre and Gonzalez, 1990). Une des premières tentatives de classification des erreurs humaines date du début des années 80 (Rasmussen et al., 1981). Depuis, plusieurs typologies ont été proposées : celle de Reason en psychologie cognitive, celle de Nicolet en ergonomie et celle de De Keyser en psychologie du travail.

3.2 Typologie des erreurs humaines

Reason a introduit un système générique de modélisation de l'erreur (GEMS pour Generic Error-Modelling System), qui s'inspire du modèle de raisonnement de Rasmussen où sont distingués les trois types de comportements cognitifs : l'un basé sur les automatismes (SB), le second basé sur les règles (RB) et le dernier basé sur les connaissances déclaratives (KB). A partir de ce modèle général, Reason s'intéresse à l'explication psychologique de l'apparition de l'erreur. Ce modèle est donc applicable à bon nombre des activités humaines.

La typologie des comportements cognitifs de Rasmussen (Figure 1.1) sert de base à la typologie d'erreurs de Reason. Par analogie avec la fiabilité technique, Reason parle de modes de défaillance qui donnent les indices observables par lesquels une erreur est décelée. Chacun de ces modes de défaillance a une ou plusieurs causes à caractère psychologique.

Les modes de défaillance recensés par Reason du type SB sont l'inattention et l'attention excessive (Figure 1.2). Pour l'inattention, les causes sont :

- Une perturbation ou une interruption dans le séquençement d'actions en cours qui favorise les oublis ;
- Une « intentionnalité réduite », c'est-à-dire qu'un délai entre la formation d'une intention et son exécution effective peut conduire à oublier l'objectif de la séquence d'action en cours ;
- Une « confusion perceptive », qui traduit l'idée que des caractéristiques peuvent être perçues de façon très grossière quand celles-ci sont devenues familières (l'effort impliqué dans la reconnaissance est minimal) ; des caractéristiques approximativement similaires d'une action peuvent ainsi conduire à faire exécuter une action non souhaitée.

Dans le cas d'une attention excessive, la vérification à contretemps peut conduire à perturber l'action en cours par l'attention qui se fixe sur un point particulier, alors que cela n'est pas prévu ; cela survient pour les tâches fortement automatisées et peut conduire à des difficultés de repositionnement par rapport à la tâche en cours.

Type de comportement	Modes de défaillance	Causes psychologiques
SB	<i>Attention excessive</i>	Vérification à contretemps
	<i>Inattention</i>	Perturbation Intentionnalité réduite Confusion perceptive

Figure 1.2 : Erreurs au niveau SB

Les modes de défaillances pour le comportement RB sont une application erronée de bonnes règles et l'application de mauvaises règles (selon Reason, « une bonne règle est celle qui s'est révélée utile dans une situation particulière ») (Figure 1.3).

L'application erronée de bonnes règles a pour causes :

- Une « règle forte mais fausse », lorsque le sujet est face à une situation non reconnue et qu'il applique une règle qui s'est jusqu'ici avérée utile faute d'en avoir une adaptée ;
- Une situation peut être ambiguë, c'est-à-dire perçue à travers des « signes » et des « contresignes » ; certaines caractéristiques peuvent confirmer une règle alors que d'autres peuvent venir la contredire, il peut également arriver que ces contresignes soient rejetés car ils ne correspondent pas à l'image que se fait le sujet ;
- Une capacité de traitement limitée, qui implique que l'ensemble des informations disponibles qui peuvent conduire à se faire une représentation complète de la situation, ne sont pas toutes traitées ;
- Une compétition entre règles, qui indique une préférence pour certains signes au détriment d'autres ; plus une règle est forte, plus elle aura tendance à être considérée comme la plus vraisemblable ;

- Un « conservatisme cognitif », qui conduit le sujet à ne pas changer les règles qu'il a établies au profit de règles plus élégantes et plus simples.

L'application de mauvaises règles a pour causes (Figure 1.3) :

- Une représentation partielle de l'espace-problème, qui conduit à des actions sur certains aspects et à négliger les autres (exemple du conducteur débutant qui éprouve des difficultés à contrôler la direction et le passage de vitesses) ;
- Une représentation incorrecte de l'espace-problème, c'est-à-dire une représentation simpliste des propriétés physiques du monde ;
- De mauvaises habitudes, qui consistent à employer des règles erronées (erreur de calculs), maladroites, inélégantes ou déconseillées (violation consciente de règles de sécurité) pour atteindre un objectif ; ces règles peuvent avoir certains avantages mais sont potentiellement dangereuses ;
- Une confiance excessive en ses capacités : le sujet ne respecte pas certaines consignes, de sécurité notamment, car il est convaincu qu'il aura toujours suffisamment de temps pour faire face aux situations redoutées le cas échéant (c'est le cas de l'automobiliste qui ne respecte pas les distances de sécurité recommandées sur autoroute).

Type de comportement	Modes de défaillance	Causes psychologiques
RB	<i>Mauvaise application de règles correctes</i>	Règles fortes mais fausses Ambiguïté des situations Capacité limitée de traitement Compétition entre règles "Conservatisme cognitif"
	<i>Application de mauvaises règles</i>	Représentation partielle de l'espace-problème Représentation incorrecte de l'espace-problème Mauvaises habitudes Règles déconseillées

Figure 1.3 : Erreurs au niveau RB

Les défaillances du niveau KB (Figure 1.4) se produisent quand le sujet met en œuvre son attention sur un problème qui n'a pu être résolu au niveau RB.

Les modes de défaillance peuvent être :

- Une récapitulation biaisée ou « illusion du pointage », qui indique que le plan d'action est évalué par rapport à certains aspects de la situation et non de manière systématique et rigoureuse sur l'ensemble des données disponibles ;

- Une résistance au changement, qui indique qu'un plan d'action initialement établi est maintenu malgré les nouvelles données qui indiquent que l'objectif poursuivi n'est pas accessible de cette façon ;
- Une limitation de l'espace de travail, ou principe du « premier entré/premier sorti » selon lequel l'interprétation des caractéristiques du problème est réalisée par rapport à un modèle mental (la charge de travail est différente selon la façon dont le problème est posé) ;
- « Hors de la vue, hors de l'esprit », ou « heuristique d'accessibilité », selon laquelle la priorité est donnée aux faits qui viennent facilement à l'esprit ;
- Une difficulté à maîtriser la complexité, qui est liée à :
 - une perception limitée des aspects temporels, c'est-à-dire une mauvaise maîtrise des processus présentant un temps de réponse important (les actions sont alors réactives, c'est-à-dire dirigées par les données, plutôt qu'anticipatives) ;
 - une difficulté à traiter les évolutions exponentielles, c'est-à-dire qu'il y a sous-estimation systématique de l'importance de certains phénomènes ;
 - une forte tendance à raisonner selon des séquences linéaires, c'est-à-dire que les effets des actions ne sont pas considérés sur l'ensemble du processus ;
 - un « vagabondage thématique et enkystement », qui apparaissent dès qu'un problème ne trouve pas de solution ; le vagabondage est le passage d'un aspect à un autre sans démarche précise, l'enkystement est une focalisation excessive sur un aspect particulier du problème (De Keyser emploie le terme de fixation (De Keyser, 1990) ;
- Un biais de confirmation, qui correspond à un phénomène de rejet d'ambiguïté, c'est-à-dire qu'une préférence est accordée aux interprétations disponibles malgré l'arrivée d'informations qui viennent la remettre en question ;
- Une difficulté à se représenter la causalité, en raison d'une simplification excessive des phénomènes causaux, qui conduit à juger sur des critères de similarité avec des cas antérieurs, donc à ne pas considérer l'ensemble des cas possibles ;
- Une difficulté à diagnostiquer, directement liée à la conduite de raisonnement ; l'erreur peut provenir d'une imbrication néfaste entre assimilation des symptômes et génération des scénarii qui ont pu conduire aux symptômes observés ;
- Une mauvaise sélectivité, qui indique que trop d'attention est accordée à des caractéristiques non pertinentes, c'est-à-dire que l'attention est absorbée par des aspects psychologiquement attirants.

Des travaux expérimentaux ont également montré que la grande majorité des erreurs sont corrigées avant leur effet sur le processus. Reason cite trois modes de détection de l'erreur : par un écart entre l'intention et le résultat observé (analogie avec la boucle de rétroaction en automatique), blocage des actions par les automatismes (ce sont généralement les sécurités mises en place en conception ou les règles d'intégrité de l'organisation), et la détection par un tiers (contremaître ou supérieur hiérarchique). Selon Reason, la non détection est susceptible de conduire à des conséquences graves, et l'étude des accidents du type *Three Mile Island* a

permis de montrer que certains processus cognitifs sont plus particulièrement responsables de la non détection d'erreurs par l'homme.

Les travaux expérimentaux relatés par Reason ont un caractère expérimental fort, puisque les résultats ont été obtenus dans des conditions et des contextes différents de ceux rencontrés in situ, et les conclusions tirées n'ont pas une portée générale. Cependant, le résultat qu'il faut en tirer est le suivant : vouloir réduire les erreurs humaines est illusoire, il faut plutôt s'attacher à se prémunir contre les conséquences possibles d'erreurs difficilement corrigées par les hommes, sans une intervention auxiliaire. C'est l'objectif que nous fixons à notre SIADG.

<i>Type de comportement</i>	<i>Modes de défaillance</i>	<i>Causes psychologiques</i>
KB	<i>Récapitulation biaisée</i>	"Illusion du pointage"
	<i>Résistance au changement</i>	Résistance au changement
	<i>Limitation de l'espace de travail</i>	Principe du "premier entré/ premier sorti"
	<i>Hors de la vue, hors de l'esprit</i>	"Heuristique d'accessibilité "
	<i>Difficultés avec la complexité</i>	Perception des aspects temporels limitée Difficulté à traiter les "évolutions exponentielles" Forte tendance à raisonner selon des séquences linéaires Vagabondage thématique et enkystement
	<i>Biais de confirmation</i>	Rejet d'ambiguïté
	<i>Difficultés avec la causalité</i>	Simplification excessive de la causalité
	<i>Difficultés de diagnostic</i>	Conduite de raisonnement
	<i>Sélectivité</i>	Attention du sujet

Figure 1.4 : Erreurs au niveau KB

D'autres auteurs ont proposé des typologies de l'erreur humaine qui ont fait date. Nicolet a une approche plus spécifiquement dédiée à la conduite d'ateliers de production. Il propose une typologie basée sur une approche ergonomique de l'erreur et établie à partir des étapes d'une tâche ; avec ce découpage, l'auteur distingue plusieurs types d'erreurs (Nicolet, 1990) : les erreurs de perception, les erreurs de décodage, le non respect d'une procédure, les erreurs de communication et les erreurs de représentation qui traduisent les écarts qui peuvent exister entre les certitudes de l'opérateur et la situation réelle. De Keyser propose une approche davantage orientée vers la psychologie du travail. L'auteur distingue quatre grandes classes

d'erreurs (De Keyser, 1990) : erreurs d'évaluation, de coordination, d'intégration et de planification. Notons que dans une décision d'organisation impliquant plusieurs acteurs, les erreurs de communication et de coordination peuvent être prépondérantes. Les erreurs de coordination dans une équipe de conduite sont dues, par exemple, à une charge de travail trop importante (qui peut entraîner des délais et oublis de transmission d'informations), à une mauvaise évaluation temporelle (mauvaise connaissance de l'état général du système), à une difficulté à joindre les personnes à contacter, ou bien à des facteurs psychologiques ou organisationnels (par exemple rétention d'information et conflits). Les erreurs de communication interviennent lors de l'échange d'informations entre agents ; une information peut être mal transmise ou mal comprise par l'opérateur qui reçoit.

Les typologies de Nicolet et de De Keyser sont orientées supervision de processus de fabrication. Celle de De Keyser est principalement centrée sur la description des erreurs cognitives (évaluation, intégration, planification), alors que celle de Nicolet décrit plus spécifiquement les erreurs commises au niveau des étapes d'une tâche (perception, décodage, représentation, décision, définition de procédures, action, communication). La typologie de Reason s'intéresse plus particulièrement aux mécanismes de production de l'erreur et propose une explication psychologique à leur occurrence ; elle a une portée plus générale que les deux autres et n'est pas spécifique à la conduite de processus industriels.

Ces typologies répondent, en fait, à des objectifs spécifiques (Benkhannouche, 1996) :

- Pour Nicolet, il s'agit d'avoir une typologie utilisable par l'ergonome, c'est-à-dire qui mette l'accent sur les traces de l'erreur, de façon à permettre de proposer des solutions ergonomiques ;
- Pour De Keyser, la typologie d'erreurs doit prendre en compte la dimension temporelle de l'activité de conduite ;
- Pour Reason, il s'agit de recenser les causes psychologiques des erreurs commises, en conduite de processus industriel comme dans les situations de la vie quotidienne.

3.3 Conséquences sur la conception du système d'aide à la décision

Le découpage du processus de la décision selon trois dimensions de l'activité humaine, collective, cognitive et opératoire nous semble permettre de regrouper les erreurs humaines et de synthétiser l'apport de chacune des trois typologies mentionnées ici.

La dimension collective ou sociale tient compte des erreurs dues à des problèmes de coordination entre les membres de l'organisation impliquée dans le processus décisionnel.

La dimension cognitive, qui regroupe les aspects ajustement, adaptation et anticipation dans le processus décisionnel est exposée aux erreurs d'évaluation (mauvaise interprétation des observations ; informations que le décideur ne prend pas en compte parce qu'elles sont associées à des événements dont la probabilité d'occurrence est faible, à des valeurs dont une variation significative lui semble improbable : le décideur ne va donc pas s'en enquérir et négliger ni plus ni moins cette information ; identification déficiente de la causalité des

événements), erreurs d'intégration (interprétation correcte de la situation mais action non pertinente, mal jaugée, effets inopportuns ; incohérence entre le temps de réponse des mesures mises en place et la réalité de la situation ; incapacité à évaluer le temps de réponse de l'action entreprise) et erreurs de planification (mauvaise anticipation des évolutions et mauvais choix de la stratégie d'action ; incapacité à estimer la durée d'une crise, les délais et contraintes liés à l'urgence ; mauvaise évaluation de la nature de la situation (situation de routine, de maîtrise, de crise, d'exception voir section 4.2).

Enfin, la dimension opératoire, qui tient compte des actions, des procédures... Les erreurs qui peuvent être commises ici relèvent spécifiquement d'une mauvaise réalisation des plans d'actions.

Cette classification très générale reste cohérente avec les typologies proposées ci-avant et met en avant deux problèmes majeurs pour améliorer la fiabilité humaine : d'une part, l'importance de la représentation et de la compréhension de la situation de décision rendue d'autant plus compliquée que les décisions sur des activités à risques implique généralement un collectif ; d'autre part, la complexité de l'interprétation de la situation liée aux aspects dynamiques du processus décisionnel. Ces deux points essentiels sont à l'origine des fonctionnalités de notre système d'aide à la décision : les modèles que nous proposons dans ce manuscrit aborderont donc la décision comme un processus dynamique et supporteront des procédures de résolution itératives qui favorisent l'interaction homme-machine.

Le Tableau 1.1 propose quelques exemples d'erreurs qui perturbent le processus de décision et leur associe une aide informatique supposée éviter l'occurrence du problème à l'origine de l'erreur.

	Modes de défaillance	Apport du SIADG
Erreurs de Coordination	<ul style="list-style-type: none"> • Répartition des rôles et orchestration des tâches mal définies • Problèmes relationnels • Organisation rétive qui sélectionne ou favorise tel ou tel scénario en fonction de ses intérêts • Il n'y a pas une décision, un décideur, mais une série de stratégies et de compromis entre les points de vue, entre des groupes qui ne partagent pas la même solution 	<ul style="list-style-type: none"> • Piloter la délibération en fonction du rôle de chacun • Contrôler les influences dans un réseau social • Gérer l'argumentation des alternatives • Contrôler la dynamique de débat • Gérer la fusion des avis
Erreurs d'évaluation	<ul style="list-style-type: none"> • Disparité, dispersion et divergence des opinions difficilement contrôlables (conflit de préférences) 	<ul style="list-style-type: none"> • Gérer les incertitudes dans la fusion d'avis

	<ul style="list-style-type: none"> • Multiplicité de rationalités différentes qui s'imbriquent, se superposent, se confrontent (affrontement de logiques décisionnelles) • Incertitudes épistémiques, état des connaissances jugé insatisfaisant • Principe de la rationalité limitée • Les informations disponibles sont généralement incomplètes, imprécises ou contradictoires • La justification est un incontournable exercice de rhétorique pour légitimer une décision engageant un collectif d'acteurs • La liste est longue des biais cognitifs auxquels les dirigeants sont exposés. Les problèmes stratégiques, par leur importance, leurs ambiguïtés, leur singularité, favorisent les erreurs et les désillusions • Le dirigeant n'aborde pas les situations d'un œil vierge. Il a notamment des représentations de ce qui est important ou non, de ce qu'il convient de faire ou non. Il s'appuie sur des règles et principes qui sont pour lui des évidences, mais qui pour l'observateur apparaissent comme des croyances, c'est-à-dire des manières de penser dont la validité n'est pas démontrée • Un problème stratégique est toujours une configuration complexe de faits et d'interprétations • Perception sélective du décideur, traitement séquentiel, capacités de calcul et de mémorisation limitées, sensibilité aux caractéristiques de la tâche, action sur l'environnement... • La décision ne peut être ramenée à la norme du calcul parce que le calcul néglige la complexité, c'est-à-dire l'existence de critères d'évaluation multiples ; le calcul 	<ul style="list-style-type: none"> • Gérer les avis divergents voire contradictoires • Contrôler la délibération pour réduire l'incertitude épistémique • Identifier des solutions juste pertinentes • Fusionner des données imprécises et incertaines • Expliquer et argumenter • Fournir un modèle formel de la situation de décision afin qu'il devienne le support qui formalise la délibération. • Objectiver la situation en construisant un modèle même purement symbolique afin que les acteurs de la décision puissent échanger des offres argumentées • Expliciter les modèles de préférences des acteurs • Modéliser dynamiquement le processus de décision • Aborder la complexité avec des modèles de préférences multicritères • Distinguer une mesure ou une donnée de son interprétation ou utilité par rapport à un objectif
--	--	--

	<p>néglige le sujet connaissant qui interprète l'information</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ce n'est pas l'information brute qui sert à décider mais plutôt le sens qu'a cette information. Une information ne dit rien de ce qu'il faut faire, seule son interprétation l'indique. Le sens de l'information n'est jamais contenu dans l'information elle-même. 	
Erreurs d'intégration	<ul style="list-style-type: none"> • La décision peut être un processus long et enchevêtré (boucles cognitives, causalités enchevêtrées) • Dans une décision de groupe, s'il n'y a pas nécessité d'aboutir à une décision commune (compromis), les membres d'un groupe débattent de leurs opinions personnelles, mais sans chercher à retravailler cognitivement les opinions exprimées par les autres, ce qui peut pénaliser la dynamique d'obtention d'un consensus • L'objectif d'un consensus ne doit pas être de supprimer les conflits, mais de les tolérer. Plus les options individuelles sont variées, plus la confrontation est importante et plus la reformulation du problème peut devenir explicite. La dynamique de consensus est fonction de l'intelligence de cette phase de délibération • La décision en organisation n'obéit pas à un modèle rationnel linéaire, de nombreuses itérations sont nécessaires entre les phases d'information, de représentation et de sélection 	<ul style="list-style-type: none"> • Introduire des boucles de rétroaction dans le modèle dynamique du processus de décision • Préférer une négociation argumentée à un simple échange d'offres/contre-offres • Gérer dynamiquement la diversité d'opinions pour identifier les points importants qui sont sujets de discord, les négocier en priorité • Impliquer les acteurs de la décision dans un schéma itératif du processus de décision et favoriser l'interaction homme/machine à travers une boucle de rétroaction
Erreurs de planification	<ul style="list-style-type: none"> • Incertitudes générées par l'environnement, imprédictibilité de la réaction de l'environnement • Les processus qui fabriquent la stratégie s'écartent souvent de la 	<ul style="list-style-type: none"> • Gérer l'incertitude dans l'évaluation des conséquences de la décision • Adapter les objectifs en fonction de l'évolution de la situation

	<p>rationalité mise en scène par le dirigeant décideur mais cela ne signifie pas que le dirigeant soit impuissant. Il peut développer des moyens indirects de contrôle et d'influence allant dans le sens souhaité. Le dirigeant peut se poser en arbitre régulateur des conflits internes et favoriser les projets et les acteurs qui sont compatibles avec ses propres préférences et ses propres ambitions.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les événements stratégiques non prévus constituent des mises à l'épreuve du paradigme stratégique, des tests de la capacité du dirigeant à maintenir l'entreprise sur une trajectoire favorable. Ils sont aussi pour les dirigeants l'occasion de faire évoluer le paradigme : redéfinir ce qui doit être tenu pour vrai et ce qui doit être tenu pour bon, et réorienter les forces qui façonnent la stratégie du groupe • Le décideur in fine sert de détonateur à l'élaboration de nouvelles politiques au sens large du terme 	<ul style="list-style-type: none"> • Distinguer l'inclination a priori de la décision finale d'un acteur • Modéliser la notion d'influence • Redéfinir dynamiquement dans un contexte adaptatif la stratégie d'action selon le triptyque efficacité (atteindre les objectifs), efficacité (au moindre coût), efficacité (cohérence entre les objectifs et les moyens) • Utiliser le SIADG comme l'organe de commande à partir duquel la délibération sera pilotée
Erreurs d'exécution	<ul style="list-style-type: none"> • La formulation de la stratégie serait l'apanage du dirigeant et sa mise en œuvre serait la mission de l'ensemble de l'entreprise. Cette distinction si naturelle occulte le rôle considérable de l'organisation dans la réalisation de la stratégie • Les objectifs fixés ne sont pas atteignables • Mauvaise application des plans d'actions 	<ul style="list-style-type: none"> • Distinguer le souhaitable du réalisable, la préférence de la nécessité • Gérer la rationalité limitée dans le calcul de la solution la plus pertinente • Asservir le processus de négociation des objectifs • Contrôler l'écart entre les objectifs et les performances réalisées

Tableau 1.1 : Défaillances humaines dans le processus de décision et aides informatisées

Les erreurs de coordination peuvent être dues à des problèmes de communication, de répartition des rôles et des tâches, ou à des problèmes d'ordre relationnel, elles concernent de toute façon la dimension collective de la décision. Les améliorations envisageables sont

d'augmenter la résolution collective de problèmes, de contrôler les influences, de négocier les conflits et d'instaurer des relations de confiance entre les acteurs de la décision, de piloter la délibération efficacement, de gérer pertinemment le processus de fusion des points de vue. Le comportement collectif pourrait être assisté par des systèmes stimulant une meilleure circulation des informations, une gestion optimisée du partage des connaissances utiles à l'action et une meilleure orchestration de la phase de délibération. Ces aides relèvent de l'intelligence collective, du travail collaboratif (Penalva and Montmain, 2002). Ainsi, par la mise en œuvre de systèmes informatisés de management, il est possible d'induire une dynamique et une réactivité nouvelles dans l'organisation. La délibération entre différents systèmes de valeurs est favorisée, le travail collaboratif soutenu par une plate-forme informatisée d'échanges des points de vue encourage le développement de coalitions, la négociation de compromis ou l'élaboration de consensus. Les modèles que nous proposerons dans ce manuscrit favoriseront le rôle de médiation du SIADG.

Les erreurs d'évaluation peuvent être réduites par des aides destinées à améliorer la représentation de la situation et la perception de sa dynamique en particulier. Cela consiste à fournir une information compatible avec les modes de représentation et de raisonnement des acteurs de la décision. Il s'agit notamment :

- de concevoir une véritable interface homme-machine (IHM) pour le SIADG, de manière à présenter aux différents acteurs une information pertinente et dynamique par rapport à la situation et adaptée à leurs modes de raisonnement, leurs systèmes de valeurs. Les connaissances utiles à l'action doivent être facilement accessibles, être restituées de manière synthétique et cohérente avec les modes cognitifs des acteurs : le SIADG doit favoriser une lecture aussi claire que possible d'une situation incertaine et souvent ambiguë. La décision et l'apprentissage sont des processus dynamiques qui exigent donc une IHM spécifique de monitoring des indicateurs décisionnels dans le temps ;
- d'appréhender au mieux le caractère complexe d'une situation de décision en proposant des modèles de préférences qui intègrent la notion de multicritère et de multi points de vue ou multi acteurs, de modéliser explicitement la différence qu'il y a entre l'information (l'observable) et son interprétation (l'utilité de l'observable) par un individu pour un objectif donné. Le SIADG devra gérer modèles de préférences des choix et contraintes opérationnelles de l'action ;
- de permettre au décideur d'évaluer rapidement une situation et de l'aider à diagnostiquer les risques encourus. Le SIADG doit permettre d'automatiser le traitement de l'information nécessaire à ce diagnostic afin de suppléer autant que possible l'être humain sur des problèmes de recherche combinatoire, d'incertitude liée à la multitude, la variété et l'imprécision des opinions. Toute décision doit être accompagnée d'une estimation des risques attachés à la situation qu'ils soient dus à une déficience épistémique ou à une forte variabilité ou dispersion de l'opinion. L'évaluation repose sur un état des connaissances que le SIADG doit pouvoir restituer à tout instant pour justifier ou argumenter la rhétorique décisionnelle du collectif et alimenter le débat. L'évaluation assistée de la situation doit canaliser la

réflexion sur les points critiques et ainsi favoriser la dynamique de réduction des incertitudes épistémiques².

Les erreurs d'intégration révèlent des écarts entre les adaptations apportées par l'organisation concernant le bon déroulement de la planification et les contraintes (souvent temporelles) imposées par la situation, une mauvaise compréhension de l'enchaînement causal des conséquences de la décision. Une amélioration consisterait à proposer aux décideurs des fonctionnalités d'explication de la situation et les moyens de s'adapter aux événements perturbateurs qui modifient les conditions dans lesquelles les objectifs peuvent être maintenus, d'avoir une gestion dynamique de l'efficacité ; il peut s'agir d'une remise en question de la perception de la situation comme d'une modification de la stratégie. L'aide à l'adaptation consiste à proposer aux acteurs de la décision des indicateurs sur la marche à suivre, c'est-à-dire du conseil d'action ou bien les guider dans la révision de leurs objectifs. Le SIADG doit être en mesure de proposer la dimension stratégique sur laquelle agir ou l'information à acquérir pour réduire au mieux les incertitudes, converger au plus tôt vers une situation décidable ou une solution équitable.

Les erreurs de planification peuvent être levées en fournissant au décideur les moyens de décider d'une intervention dans les délais imposés par la situation. Il semble que les aides correspondantes sont celles qui permettraient de fournir des stratégies basées sur le diagnostic de la situation : l'incapacité d'atteindre un niveau de certitude acceptable avec la stratégie entreprise. Ces aides sont dites aides à l'anticipation. Ce type d'aide diffère notamment de l'aide à l'adaptation par le fait qu'une stratégie implique que le système d'information soit capable d'évaluer une situation au regard des objectifs et des contraintes de la planification. Le SIADG doit donc être capable d'anticiper qu'aucun consensus ne pourra être obtenu pour une stratégie définie a priori et que le modèle décisionnel—contraintes et objectifs—n'est pas viable et qu'il doit être modifié en conséquence. La modification la plus élémentaire correspond à la révision des objectifs stratégiques. Cette évolutivité du système de valeurs utilisé par le SIADG dans son module d'évaluation est essentielle car elle laisse entrevoir un élément de réponse au problème qu'entre les choix énoncés et les résultats promis et attendus, le temps peut être long, et que pendant ce temps, les orientations prises ne manqueront pas d'être contestées ou détournées, à la faveur d'événements extérieurs qui sembleront remettre en question le projet.

Les erreurs d'exécution peuvent avoir des causes multiples, par exemple le non respect de certaines règles organisationnelles, auquel cas des mesures visant à supprimer les mauvaises habitudes doivent être envisagées, mais aussi la définition d'objectifs non atteignables. Ces erreurs peuvent également être dues à la mauvaise sélection ou réalisation d'une procédure. Une solution consiste alors à proposer aux différents acteurs de la décision des supports pour

² L'incertitude épistémique est l'incertitude relative au degré de connaissance. A une date donnée, l'état des connaissances détermine la précision et la vraisemblance de l'évaluation de la situation et par suite la fiabilité de la décision qui en découle. Pour parvenir à une situation décidable, cette incertitude devra être dissipée. C'est l'objet de la conduite du processus décisionnel.

l'application de procédures en particulier en situation de crise (conduite à tenir en cas d'accident nucléaire, d'incendie, etc.), des outils pour la validation et la vérification du bon déroulement de la planification.

Les aides de la dimension cognitive apparaissent essentielles. Il s'agit d'assister les décideurs dans leur évaluation d'une situation multidimensionnelle et multi acteurs avec un état des connaissances à un instant donné. Il faut faciliter la restitution de la logique décisionnelle appliquée, en interne pour soutenir les acteurs dans leurs modes cognitifs d'une part, à des fins argumentatives pour un public externe d'autre part. Une fois la situation correctement appréhendée, il s'agit ensuite d'assister les décideurs dans la dynamique à mettre en place pour ne pas laisser au hasard l'évolution de la situation, pour poursuivre et fiabiliser leur entreprise de manière cohérente avec leur système de valeurs d'une part, pour diagnostiquer au plus tôt toute déviance manifeste quant aux objectifs fixés. L'aide à l'évaluation permet d'estimer la valeur de chaque solution et de les comparer, les argumenter. L'aide à l'adaptation permet de s'assurer que les actions entreprises sont cohérentes avec le système de valeurs et la dynamique de la situation. L'aide à la planification permet de diagnostiquer le changement de nature de la situation et d'anticiper une orientation avec un autre système de valeurs, de préférences. Cependant aborder la question de la décision collective remet au premier plan les aides à la coordination. Le SIADG doit permettre d'orchestrer, piloter, contrôler la délibération qui conduit à la décision collective afin de trouver des consensus, de régir les conflits ou encore de gérer les influences au sein du réseau social que constituent les acteurs de la décision.

4. Un exemple de décision d'organisation : activités à risques et sécurité industrielle

4.1 Gouvernance des activités à risques

L'importance croissante de la notion de risque dans la sphère sociétale (au point que l'on parle aujourd'hui de la société du risque, comme l'on parlait très récemment de la société de l'information) exige de porter une attention particulière à la problématique de la justification des activités à risque. Cette problématique prend en compte l'ensemble des aspects sociaux, juridiques, politiques, scientifiques, économiques et éthiques qui conduisent à la notion de gouvernance des activités à risque.

L'aversion sociétale à la notion de risque acceptable introduit des problèmes nouveaux amenés par exemple par la prise en compte de la longue durée (risque différé) ou encore par la redéfinition du périmètre de l'analyse (installation industrielle, activité de gestion, politique technique). Une manière de contourner cet obstacle consiste à comparer des options en support d'une décision à prendre plutôt que de comparer une solution à une courbe de risque acceptable prédéfinie.

On peut cependant s'interroger sur la pertinence de mettre l'accent sur la décision, rupture instantanée entre un avant et un après, ou sur le processus d'élaboration, succession

d'opérations aboutissant à une décision finale. La durée nécessaire de l'action d'élaboration introduit de nouvelles dimensions psychologiques : la ténacité, la persévérance, la constance du jugement porté sur l'événement. D'une phase à une autre, certains des acteurs changent et des agents différents s'expriment au nom de ces acteurs. Différentes rationalités se trouvent ainsi en confrontation, en coopération ou en conflit. L'apparition d'irréversibilités dans le processus conduit à reconsidérer les stratégies (e.g. choix d'un scénario pour le cycle électronucléaire français). A cela s'ajoutent les caractéristiques de la décision en situation complexe : incomplétude et imperfection de l'information, dilemme entre décision immédiate et décision retardée, exploration au voisinage du présent ou saut dans l'inconnu...

On constate encore trop souvent que la prise en compte du risque dans la société et l'industrie est plus un diagnostic passif qu'une action positive d'évaluation, de gestion stratégique, de management. Le management de la sécurité industrielle peut être fondé sur deux approches stratégiques : l'anticipation et la recherche de résilience.

- L'anticipation consiste à rechercher la parade a priori à toutes les situations envisageables ; cette stratégie paraît réaliste dans le cas de prise en compte de risque avéré ; elle serait fondée sur l'analyse des défaillances possibles ;
- Face à l'imprévisible, une autre stratégie consiste à améliorer les capacités de résilience du système considéré en situation imprévue. Autrement dit, il s'agit d'analyser et améliorer la capacité et la promptitude du système à assurer à nouveau sa mission suite à un dysfonctionnement majeur.

Les deux stratégies ont en commun de s'appuyer sur le retour d'expérience des accidents et catastrophes, mais aussi des accidents mineurs et des quasi-accidents, ces derniers pouvant apporter plus d'informations pertinentes tant en terme de phénoménologie qu'en termes de prévention. L'accident assorti de conséquences extrêmes reste en effet, et cela est heureux, un événement rare difficilement évaluable en terme de probabilités.

La problématique de la prise de décision repose sur le choix de l'attitude adoptée face au risque dans les différentes situations de gestion. Face à l'incertain, s'il va de soi que toute stratégie repose nécessairement sur un ensemble d'informations sur la situation décisionnelle, l'obtention, la disponibilité, la gestion, l'organisation, le partage, l'échange, le traitement, la fiabilité, la pertinence, la complétude, l'interprétation de cette information sont autant de dimensions qui, dans nombre de situations complexes remettent en cause une formulation des décisions sous la forme de problèmes d'optimisation de la recherche opérationnelle bien posés.

Enfin, peut-on s'interroger sur le « bien fondé » d'une décision ? Il est en effet nécessaire de distinguer l'évidence et la pertinence de celle-ci. L'évidence relève d'une cohérence interne, d'une compatibilité avec une structure logique ; la pertinence relève d'une cohérence externe, d'une compatibilité avec une situation extérieure. Il y a les solutions logiques (évidence) et les solutions efficaces (pertinence), qui ne coïncident pas toujours. La décision est un processus d'interaction entre le décideur et le monde (Jarrosso, 1994). La gouvernance des activités industrielles à risques ne saurait être détachée d'une vision sociétale, ce qui explique que les

décisions doivent être prises dans un contexte ouvert avec les partenaires institutionnels et politiques : on est donc bien dans la recherche de solutions pertinentes plutôt qu'évidentes, tout ne saurait se ramener à un problème d'optimisation.

4.2 Dynamique des situations décisionnelles

Le concept même de management du risque peut être redéfini avec plus de profondeur, comme reposant sur le traitement de l'incertain dans l'évaluation et la gestion des risques. Un principe essentiel de management consiste à reconnaître la nature même de la situation, avant de s'intéresser à la prise de décision et à la conduite de l'action. En effet, la prise de décision repose en grande partie sur l'attitude adoptée face au risque défini par la situation et la conduite de l'action relève de la dynamique de la situation.

La dynamique de la situation est entendue ici comme caractérisée à la fois par la cinétique de dégradation (l'intensité du risque augmente—dynamique continue) et la propension à changer de nature (l'attitude face au risque change—dynamique à événements discrets). Dans une perspective de management du risque, il faut donc porter attention à la nature des situations, aux processus d'intensification du risque, et aux processus de changement de situation.

Le système même qui est managé (une organisation, un territoire) peut être ainsi qualifié selon sa vulnérabilité (propension à la dégradation de la situation courante) et sa sensibilité (propension à susciter un changement d'attitude face au risque et donc des décisions stratégiques radicalement différentes).

Une première analyse—sémiotique—permet d'envisager quatre types d'attitude face au risque : la routine et son contraire la crise ; la maîtrise et la démaîtrise. La maîtrise s'oppose à la crise, et l'on peut considérer que la maîtrise prolonge la routine, alors que la démaîtrise découle de la crise. Chacune de ces attitudes peut être décrite par un couple (latitude de décision - latitude d'action). Ainsi, la routine et la maîtrise correspondent à une latitude d'action et de décision importante, tandis que la crise et la démaîtrise se caractérisent par une forte restriction, pouvant aller jusqu'à l'inhibition.

On peut qualifier plus précisément la latitude décisionnelle en distinguant différents types de décisions :

- décision préparée : le temps permet d'élaborer des scénarios d'action qu'il suffit de mettre en œuvre lorsque la situation le permet ou l'exige ;
- décision dynamique : les scénarios doivent être construits en situation afin de tenir compte des événements non souhaités, et des perspectives d'évolution ;
- décision forcée : l'occurrence de conséquences préjudiciables détermine les réponses à apporter ;
- décision inhibée : la méconnaissance de la situation et le niveau d'incertitude empêchent de déterminer une seule décision adéquate.

L'attitude face au risque et la latitude décisionnelle, en se combinant, déterminent la conduite de l'action. La bonne fin de cette action ne dépend alors plus que des ressources disponibles.

Il nous faut ici préciser le concept de crise qui peut introduire certaines confusions entre management du risque et gestion de crise. Si étymologiquement la crise renvoie à la décision (séparer, distinguer, puis choisir, décider, trancher, et par la suite juger, résoudre, interpréter), le terme renvoie aujourd'hui à plusieurs acceptions bien différentes : le moment où, en même temps qu'une perturbation, surgissent les incertitudes (et donc le doute et la suspicion quant à la réalité et au devenir du danger), une remise en cause (un ébranlement, un facteur de déstabilisation), une transition entre deux états (un processus, qui, sous l'effet d'un événement déclencheur, met en éveil une série de dysfonctionnements, et provoque des effets destructeurs).

Crise-état ou crise-processus ? Le premier cas sera attribué à l'attitude du manager, le second concerne un changement de situation. Nous ne définirons pas de "situation de crise" mais la crise comme processus de dégradation d'une situation préjudiciable, lorsque s'accroissent les incertitudes.

Sous l'angle du management (du risque), la situation décisionnelle peut être qualifiée à la fois par la nature des événements à gérer et par la nature des agencements organisationnels (Figure 1.1). La combinaison de changements d'échelle et d'attitude permet de caractériser quatre situations de référence (Montmain and Penalva, 1998) ; (Sanchez, 2007) :

- situation courante, où prédomine la routine ; lorsque la réponse normative et institutionnelle suffit à contrôler la complexité (dispositions réglementaires, consignes, dispositifs de surveillance et d'alerte, principes de gouvernance) ;
- situation dynamique (ou de maîtrise) nécessitant un degré plus élevé de maîtrise ; quand l'organisation, par son action, réussit à éviter les événements non souhaités ou à récupérer la situation avant que les conséquences ne s'amplifient (traitement de l'accident, lequel peut être majeur si les conséquences premières sont critiques) ;
- situation d'urgence, vécue comme une crise en préparation ; lorsque l'événement redouté s'est produit et que le problème réside dans la limitation des conséquences, celles-ci pouvant être de grande ampleur (crise majeure) ; c'est l'intervention d'organisations et de moyens spécialisés qui est ici déterminante ;
- situation d'exception, où l'on redoute la démaîtrise ; lorsque le système tout entier est déstabilisé, l'action organisée atteint ses limites et fait place à l'auto-organisation (le processus devient chaotique).

Dans les situations courantes (de routine), l'accent est mis sur l'anticipation des risques et la réduction des dangers. Le pilotage de l'activité est de type procédural, la décision se concrétise par la formalisation a priori de plans d'action (plans d'alerte, d'évacuation, de secours).

Dans les situations de maîtrise, suscitées par la détection d'événements non souhaités, l'action et la décision impliquent des stratégies élaborées pour faire face à des événements redoutés et/ou des conséquences non calculables. La représentation de telles situations et la planification de l'action sont difficiles en raison de l'émergence de phénomènes non entièrement prévisibles car partiellement modélisables (boucles, effets non linéaires, combinatoires, seuils, etc.), et en raison des incertitudes (manque d'information, impossibilité d'appréhender directement les phénomènes déterminants, non observables ou non mesurables). Dans ce type de situations, c'est l'organisation courante qui a à faire face en élevant son niveau de maîtrise pour éviter des conséquences redoutées.

Les situations d'urgence sont déterminées par l'occurrence ou l'imminence (l'occurrence ne peut plus être évitée) d'événements redoutés (c'est-à-dire ayant un impact avéré sur l'activité, cet impact pouvant être indirect comme par exemple la sortie du domaine autorisé par la législation). La décision bénéficie d'une moindre latitude que dans les situations précédentes dans la mesure où l'activité subit déjà l'impact d'événements dommageables. Elle vise à réduire les conséquences des événements redoutés sur l'activité, les hommes, l'environnement, le système social. Les moyens mis en œuvre pour traiter les situations sont spécialisés dans cette tâche (urgentistes, groupes d'intervention, sécurité civile, etc.).

La décision et l'action peuvent se trouver inhibées dans les situations d'exception, où le management de l'activité doit faire face à l'imprévu : événements ou conditions non connus, ou non retenus comme crédibles pour l'activité considérée. Même en cas de phénoménologie connue, l'imprévu peut provenir de l'inadéquation d'un plan d'action ou du fait que le plan d'action se révèle inopérant, ou encore du fait que les défenses prévues n'ont pas fonctionné ; dans ce cas, c'est la surprise qui est le facteur de crise. Enfin, la situation d'exception peut être l'aboutissement de la dégradation d'une situation d'urgence, lorsque les moyens d'intervention sont saturés (insuffisance ou incompetence), et que les perturbations deviennent récurrentes. La décision en situation d'exception n'est plus redevable d'une organisation préalable, et la part du plan d'action dans la conduite des opérations devient faible. Dans ces conditions, émergent deux modes de management : adaptation de plans d'actions et introduction de nouveaux acteurs, ce qui peut être considéré comme relevant de l'auto organisation. Quel que soit l'événement ou le processus qui conduit à la situation d'exception, elle se caractérise par une déstabilisation du système, un dérèglement, et l'accroissement de l'incertitude.

On peut repérer des changements d'échelle d'une situation à une autre :

- échelle temporelle : maîtrise et crise traitent d'un temps limité, alors que routine et démaîtrise peuvent porter sur le long terme ;
- échelle de valeur : routine et maîtrise portent des valeurs positives, ce qui n'est pas le cas de crise et démaîtrise ;
- échelle spatiale : maîtrise et crise conduisent à une action limitée dans l'espace ;
- une typologie des transitions d'une situation à une autre peut être initiée : l'alerte, la dérive et la crise, de cinétique lente ou rapide, peuvent être considérées comme

progressives ; le passage direct de la routine à l'exception, est une rupture (elle induit la surprise par le surgissement de l'imprévu, du non connu).

Sous cet angle d'analyse, la dynamique d'un processus de décision est événementielle et régie par l'occurrence des événements et la capacité des décideurs à y réagir. Mais il apparaît également quatre processus de dégradation opérant en situation (sans en changer la nature puisque l'attitude face au risque reste stable). En situation de routine, la multiplication de déficits cindynogènes fragilise le système. En situation de maîtrise, la prise de risques, consciente ou non, par le gain qu'elle procure, accroît également le danger. La dégradation d'une situation d'urgence conduit à l'accident, tandis qu'une situation d'exception peut dégénérer en catastrophe.

Enfin, il nous faut signaler deux processus de retour vers une situation plus satisfaisante :

- la récupération d'une situation d'urgence traduit le retour à la maîtrise lorsqu'il n'y a plus de dommages supplémentaires ;
- la remédiation (qui n'est pas forcément une réparation totale) consiste à retrouver un état d'équilibre.

La Figure 1.5 présente l'ensemble des concepts discutés dans cette section.

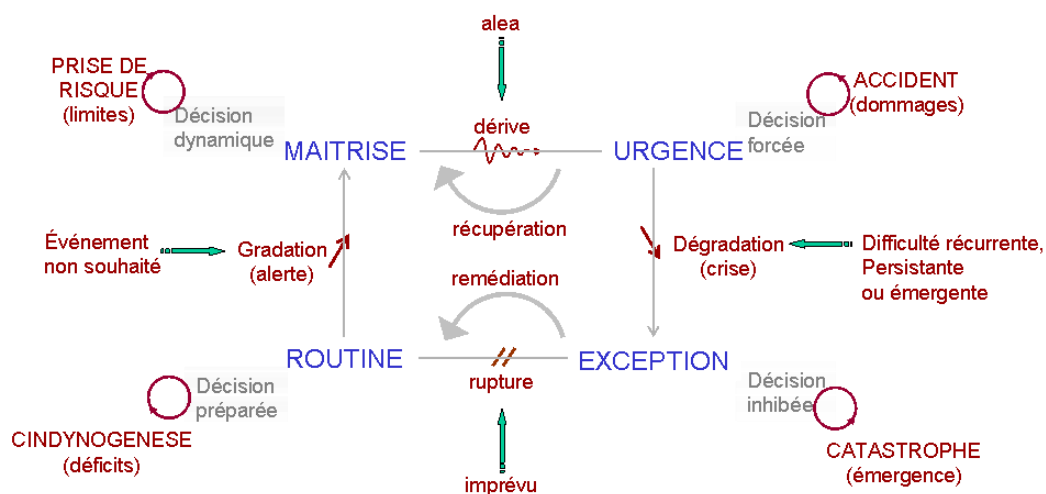


Figure 1.5 : Les situations de management des risques

4.3 Une décision d'organisation multicritère et multi points de vue

Sous l'angle du management, la situation décisionnelle peut donc être qualifiée à la fois par la nature des événements à gérer et par la nature des agencements organisationnels comme nous l'avons expliqué sur la Figure 1.5. L'étude des agencements organisationnels (réseaux de relations entre hommes et artefacts) les plus efficaces pour opérer en situation complexe revient à rechercher les modalités de construction d'une intelligence collective (niveau de

performance d'un collectif non atteint isolément par les individus) au moyen de dispositifs organisationnels (parfois très simples, parfois eux-mêmes complexes).

Sous l'angle de la décision, la situation décisionnelle est définie comme la délibération par une organisation d'un projet d'intervention sur un système évolutif et réactif dans un environnement imparfaitement perçu. Les outils méthodologiques nécessaires à l'appréhension d'une situation décisionnelle dépendent de la nature de celle-ci (Akharraz, 2004) ; (Sanchez, 2007).

- Si les objectifs et contraintes de la sécurité industrielle d'une installation ne donnent pas lieu à un débat au sein même de l'organisation, le problème peut être objectivement défini et on peut espérer en établir une représentation formelle. On dira que la situation décisionnelle est structurée. Ce premier type de situation correspond par exemple aux décisions d'amélioration de la sécurité d'une installation : les normes ont été établies par les pouvoirs politiques et les objectifs ont été définis au préalable en accord avec les partenaires institutionnels, cependant toutes les alternatives de mise en œuvre de l'amélioration ne sont pas indifférentes à l'industriel. Parmi les options imposées par la législation, l'industriel a des préférences, des solutions plus en harmonie avec sa stratégie d'évolution. Son système de préférence apparaît alors comme un raffinement des contraintes du cahier des charges imposé par la législation (Montmain, Sanchez and Vinches, 2009b). L'exercice consiste alors à élaborer cette représentation formelle qui, si elle aboutit à une description mathématique, se ramène à un problème de recherche opérationnelle. Un problème n'a de sens en recherche opérationnelle que si l'on connaît au préalable la fonction à optimiser, l'attitude à tenir face au risque (Scharlig, 1985) : il s'agit ensuite de formaliser mathématiquement la fonction à optimiser, la stratégie à suivre, les objectifs à atteindre, les contraintes à respecter, l'attitude souhaitée face au risque. La complexité du problème réside donc, dans ce premier cas, dans sa formulation mathématique et dans la résolution du modèle établi. Cette configuration donne de l'organisation une vision idéale où le collectif peut purement et simplement se ramener à un acteur unique, à un décideur monolithique ;
- L'hypothèse qu'il y a derrière ce modèle rationnel est que la décision prise doit être le résultat d'un choix comparatif entre les diverses solutions possibles selon un modèle de préférence objectif et unique : le décideur et ses conseillers en sécurité industrielle doivent mesurer avec soin les risques et les issues probables de chaque alternative, peser leurs avantages et inconvénients pour retenir finalement l'alternative qui représente le meilleur rapport « coût/efficacité ». Cette analyse, en termes de calcul rationnel, suppose un modèle objectif de la meilleure utilité qui satisfasse toute partie prenante, un espace des possibles connu du décideur d'une part et explorable sur le plan de la capacité de traitement de l'information d'autre part ;
- Ces hypothèses sont rarement valides dans un processus de décision collective, car le modèle rationnel ci-dessus fait abstraction des contraintes organisationnelles.

Or, la panoplie des solutions théoriquement possibles est souvent filtrée par l'organisation. Il faut tout de même penser que sécurité industrielle et optimisation de la production ne vont pas forcément de paire. Les propositions émanent de scénarios préétablis par des membres bien identifiés de l'organisation et le décideur ne possède pas en fait une connaissance totale de la situation, d'où le terme de « rationalité limitée » cher à H.A. Simon dans les décisions d'organisation. Les limitations dans la connaissance des faits et hypothèses proviennent des contraintes de l'organisation qui sélectionne ou favorise tel ou tel scénario en fonction de ses intérêts. Les actions ou les mesures résultantes sont élaborées à travers un processus long et enchevêtré mobilisant de nombreux acteurs ; il n'y a pas de décision, un décideur, mais une série de stratégies et de compromis entre les points de vue, entre des groupes qui ne partagent pas la même solution. Dans sa théorie du surcode (Sfez, 1992), Sfez montre que derrière l'image trompeuse d'une décision consciente et unifiée, il y a en fait une multiplicité de rationalités différentes qui s'imbriquent, se superposent se confrontent. Dès lors notamment que des ensembles humains sont concernés, les décisions sont de l'ordre du « non-programmable ».

Gommer les phases d'intelligence et de conception du processus de décision est une réduction inacceptable. L'aide à la décision consiste alors plutôt à essayer de représenter et d'améliorer la façon dont les hommes utilisent leurs capacités de raisonnement et de traitement des informations. Au lieu de chercher à désigner une décision ambitionnant d'être optimale, il est plus modeste dans les objectifs, mais peut-être plus efficace pour le résultat, de chercher une procédure de traitement de l'information et de raisonnement satisfaisante. La rationalité « limitée » ou « procédurale » vient ainsi se substituer à la rationalité optimisante et « substantive » (Simon, 1991b).

Cette analyse insiste en définitive sur les aspects cognitifs de la décision, l'acquisition et le traitement de l'information apparaissant comme plus importants pour prendre une « bonne » décision que la recherche fine illusoire d'une décision en apparence « la meilleure » (Akharraz, 2004). Les différentes phases de la décision ne se présentent pas de façon linéaire, mais en boucles. De nombreuses itérations sont nécessaires, au vu de la complexité des problèmes de décision et des capacités cognitives des acteurs, avant qu'un terme puisse être apporté au processus de décision. Davantage encore, chacune des phases engendre des sous-problèmes qui, à leur tour, appellent des phases d'intelligence, de conception, de sélection et de bilan (Simon, 1991b) ; (Simon, 1997). Si le schéma linéaire du processus de décision est ici rejeté, il n'en reste pas moins que dans cette seconde vision de la décision la planification conserve encore une place privilégiée. Nous dirons de ces situations décisionnelles qu'elles sont semi-structurées ;

On peut citer par exemple un projet d'amélioration de la sécurité d'un réseau autoroutier. Face au vieillissement de l'infrastructure qui est devenu une des préoccupations majeures des entreprises du BTP, l'exploitant d'un réseau va chercher à formaliser et à améliorer le processus décisionnel pour la maintenance

préventive et la gestion de son patrimoine dans un environnement multi acteurs et multicritère. Cette activité concerne la planification d'opérations d'entretien, d'amélioration et de mise à niveau. Le traitement de l'information est généralement formalisé selon un processus en trois étapes : mesure, évaluation et décision. Des inspections périodiques sont effectuées pour détecter les symptômes de pathologies ou des défauts de fonctionnement. L'expert responsable d'un domaine (chaussées, ouvrages d'art, bâtiments...) évalue la situation de chaque élément de patrimoine et lui associe un degré d'urgence. Le responsable de l'infrastructure pondère et coordonne les demandes des experts en attribuant un degré de priorité à chaque opération selon ses propres critères stratégiques. Un ensemble spécifique de critères est associé à chaque étape de ce processus d'évaluation. L'amélioration de la maintenance préventive dans ce contexte est davantage un problème de traitement de l'information que l'énoncé d'un problème d'optimisation multi objectifs. Il y a d'abord les aspects informatiques, où chaque collaborateur, à son niveau de responsabilité, doit rentrer et partager ses données à travers le STI de l'entreprise. Ensuite, vient l'aspect de formalisation du traitement de l'information nécessaire à l'évaluation de l'urgence des opérations de maintenance. Les demandes d'opération émanant de l'expert en charge des aires de repos pourraient apparaître de prime abord comme moins légitimes que celles émises par le conducteur d'opérations en charge de l'état des voies... Cependant les aires d'autoroute sont toujours bien entretenues ! Le responsable de l'infrastructure doit donc mettre en place un système de « conversion » de l'urgence des demandes d'un domaine d'exploitation à l'autre afin de rendre les évaluations des différents experts commensurables et de pouvoir ensuite planifier les opérations de façon rationnelle. Le problème peut donc consister à proposer une méthodologie d'évaluation cohérente qui permet aux experts d'exprimer leurs valeurs de jugements dans leur univers de discours souvent discret, de rendre commensurables ces univers de discours, de formaliser l'évaluation multicritère à chaque niveau de responsabilité, etc. (Sanchez, 2007) a montré que l'exploitant attendait en priorité de son STI qu'il instaure de nouvelles pratiques dans la circulation et la validation de l'information dans l'entreprise grâce à une formalisation mathématique des tâches d'évaluation de l'urgence des opérations de maintenance. L'idée d'optimisation de la maintenance correspondait en fait à un besoin de traitement de l'information qui s'appuierait sur des modèles d'évaluation multicritères et à une centralisation informatique des données. Sur la base de ces processus d'évaluation ainsi formalisés, la négociation de l'évaluation du degré d'urgence d'une opération entre deux niveaux fonctionnels de l'entreprise devient plus objective (Montmain, Sanchez and Vinches, 2009b) ;

- On peut également remettre en cause l'hypothèse d'un processus continu de traitement de l'information, dès lors que l'on considère les organisations comme des « anarchies organisées », c'est-à-dire sans objectifs cohérents et partagés par tous où le processus de production relève d'une technologie complexe et peu

matérialisable et dont les membres participent de façon active aux prises de décision (March, 1988) ; (March, 1991) ;

Le modèle de la décision associé remet en cause les théories où les décisions résultent d'une confrontation entre des objectifs identifiés, des solutions disponibles et leurs conséquences et les théories où les décisions sont le résultat d'une négociation entre des groupes aux intérêts divergents. Dans les anarchies organisées, des choix sont à la recherche de problèmes, des questions cherchent des opportunités pour donner lieu à décision, des solutions cherchent des questions auxquelles elles pourraient être une réponse (voire la crise de la grippe H1N1) ;

Des décisions se produisent quand les flux de problèmes, de solutions, de participants et d'opportunité de choix se rencontrent. Toute prise de décision est ainsi assimilable à une poubelle où des types de problèmes et de solutions sont déchargés par les participants dès qu'ils sont générés et qui, se rencontrant, font émerger un choix. La simulation informatique de ce modèle, a priori chaotique, ne fait pourtant apparaître que trois styles de choix possibles : les décisions par inattention, par déplacement des problèmes et par résolution des problèmes. Les deux premiers étant plus fréquents que le dernier. Cette émergence d'ordre dans les processus de décision anarchique a inspiré des travaux sur la capacité d'apprentissage des anarchies organisées. Cette dernière configuration où il s'agit de faire du « sense-making » dynamique définit ce que l'on appellera les situations décisionnelles non structurées.

La récente crise de la grippe H1N1 nous semble être une bonne illustration de ce modèle de décisions. Il est bien difficile de dégager la part de responsabilité de chacun, les objectifs visés par l'OMS, les gouvernements et les laboratoires pharmaceutiques, les intentions des gesticulations médiatiques ... Finalement, il n'y a pas eu pandémie, mais cet épisode reste un désastre... financier et médiatique ! Pourquoi ? A quels problèmes les gouvernements ont-ils finalement cherché à répondre ? En France, une commission d'enquête du Sénat sur la gestion gouvernementale de la crise pandémique de la grippe A/H1N1 s'interrogeait sur le rôle propre de la ministre de la Santé dans la gestion gouvernementale de la crise ? Quelles décisions étaient de son ressort ? Quelles responsabilités lui incombaient ? L'une des conclusions de la ministre Roselyne Bachelot avait été simplement : « D'une période de menace sanitaire grave, comme celle que nous avons connue, il faut tirer tous les enseignements utiles. Nous avons en partage le souhait de faire toujours progresser la connaissance et la gestion publique du risque sanitaire. Le temps est au retour d'expérience ».

De façon plus générale, à propos de la gestion de crises, abandonnant toute notion de plan, encore prégnante chez Simon, Lagadec revient sur la notion de sense-making et écrit : « Dès lors que l'on entre dans le domaine de la crise, que l'on quitte celui de l'urgence bien cernée, il est indispensable de déployer une capacité instantanée de questionnement à la hauteur des événements en cause et des décisions à envisager. Les quatre questions à travailler sont les suivantes :

- De quoi s'agit-il ? Le plus grand risque est de se tromper de sujet. Et le risque perdurera tout au long de la crise, car il y a souvent mutation des enjeux en cause.
- Quels sont les pièges à éviter ? Car, très souvent, un processus de rétrécissement de la réflexion se met en place et on procède par réflexes techniques plus que par intelligence stratégique.
- Avec quels acteurs va-t-il falloir travailler ? Ce sera souvent avec d'autres configurations que celles prévues antérieurement.
- Quelles initiatives créatrices ? Pour cerner les dynamiques positives à introduire dans un environnement qui sera de nature chaotique. Il ne s'agit pas de répondre à tout, mais d'apporter des actions qui fassent sens, et permettent d'enclencher des cercles vertueux. »

4.4 Conclusion et objectifs

Nous nous intéressons dans cette thèse aux processus de décision multicritère et multiacteurs. Le management de la sécurité industrielle et des activités à risques est typiquement un champ d'application privilégié car il fait l'objet de nombreuses prises de décisions critiques où se confrontent décideurs et opérationnels, experts et grand public, politiques et industriels, contraintes et enjeux, raison et pertinence. Cette illustration sur le management des activités à risques et de la sécurité industrielle permet de mettre en évidence tous les ingrédients des problèmes de décision pour lesquels nous souhaitons introduire nos outils et concepts de l'automatisation cognitive. On y retrouve tous les aspects du processus de décision que nous avons évoqués auparavant : dynamique de décision liée à l'évolution des situations, incertitude quant à la réaction du système suite à l'action de l'homme, pluralité d'opinions, d'intérêts, d'objectifs divergents voire antagonistes, ambiguïté des rôles et jeux de pouvoir, coordination et communication des acteurs de la décision, etc.

L'automatisation cognitive doit permettre de supporter la phase de délibération, *i.e.*, rendre plus efficaces l'échange d'informations et le partage de connaissances utiles à l'action (autrement dit piloter la phase de délibération), inciter à la justification et à l'argumentation des solutions afin d'objectiver les propositions et rendre plus exhaustif le champ des possibles exploré par le collectif (autrement dit diminuer les effets de la rationalité limitée et fiabiliser le choix collectif), résoudre les problèmes d'optimisation locaux (autrement dit substituer la machine à l'homme pour les problèmes purement calculatoires ou combinatoires lorsque le degré de formalisation de la tâche le permet).

Les décisions que l'on rencontre autour de la problématique de la sécurité industrielle sont multicritères. Optimiser la sécurité va en général jouer sur l'image de marque de la société, mais n'est généralement pas un objectif compatible avec l'optimisation des coûts de production. La pression sociétale qui s'exerce sur l'industrie est de plus en plus grande. Après l'explosion d'AZF, considérée comme la catastrophe industrielle majeure de ces dernières années en France, le grand public souhaite être entendu sur ce qu'il perçoit comme étant des

enjeux sociéto-économiques, et donc politiques. La prise en compte des intérêts et des besoins des citoyens constitue un déterminant important de la sécurité industrielle à court et moyen termes. Améliorer la sécurité d'une industrie a bien évidemment un coût. Afin, entre autres, de respecter les réglementations nationales en vigueur, les industriels doivent faire des investissements dans leurs installations et dans la mise en place d'outils de contrôle. Ces coûts sont souvent d'autant plus élevés que les unités industrielles sont anciennes. Cependant, pour survivre dans un marché mondial de plus en plus dur, les industriels doivent maintenir des coûts de production compétitifs. Dès lors, se pose très clairement le problème de la conciliation des coûts de la sécurité avec le maintien d'une compétitivité des industriels (Figure 1.6). Améliorer le management de la sécurité industrielle apparaît donc bien comme un problème d'optimisation multi objectifs.

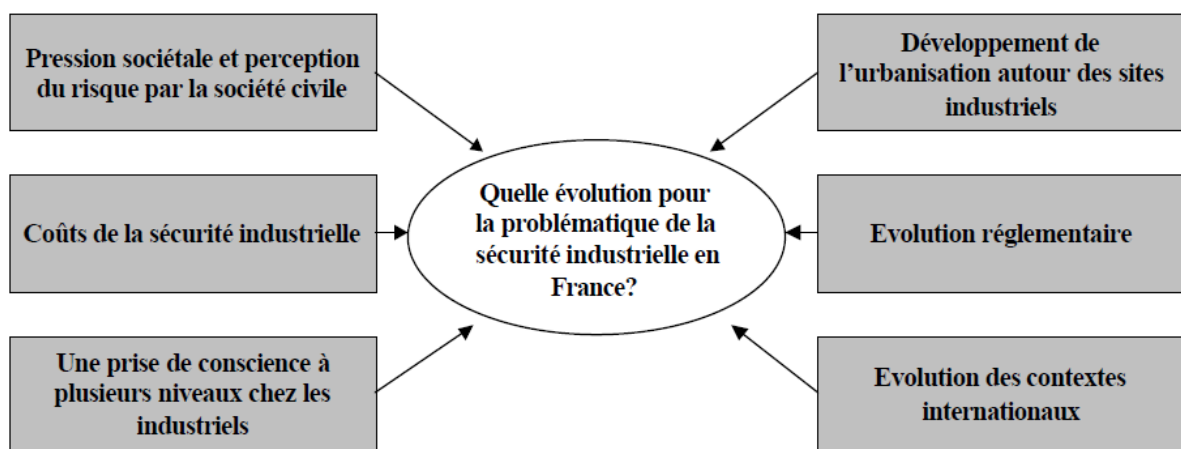


Figure 1.6 : Prospective en sécurité industrielle (DiGITIP, 2003)

Les décisions sont multiacteurs. Au sein des organisations, les décisions s'inscrivent dans des cycles de vie, plus ou moins longs, plus ou moins complexes, dans lesquels des découplages entre décision et action sont possibles. En effet des phénomènes de délais peuvent apparaître entre une prise de décision et sa matérialisation en action, ou encore entre la réalisation d'une action et la remise en cause de la décision. Par ailleurs, il existe différents types de décision et l'on distingue classiquement les décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles (Doumeingts and Ducq, 2001). Or, ces différents niveaux décisionnels sont en interaction, si bien que loin des visions hiérarchiques et cloisonnées, une organisation peut être décrite comme un réseau décisionnel. Au sein de ce réseau apparaissent des faisceaux décisionnels dans lesquels naissent des contraintes entre les différents types de décision. Ainsi, le niveau stratégique contraint le niveau tactique et restreint son champ décisionnel. Le niveau tactique, à son tour, fait de même sur le niveau opérationnel. Tant et si bien que le champ décisionnel de chaque acteur se réduit au long du faisceau décisionnel (problème de la rationalité limitée). Ces différentes contraintes sont nécessaires pour assurer la cohérence des décisions et des actions de l'organisation. Cependant, du fait des cycles de vie des décisions, un faisceau décisionnel peut, dans l'espace et/ou dans le temps, dévier de son but initial. Dans le domaine de la sécurité industrielle, ce décalage peut contribuer à l'avènement d'accidents et constitue

donc un problème majeur. En témoignent les accidents de BP Texas City ou encore de Bhopal, qui observés sous l'angle des prises de décision, soulignent l'existence et la prégnance de ce phénomène (Rigaud, 2010). La gestion des situations et processus de décision dans le domaine de la sécurité industrielle revêt alors un caractère critique (Daniellou and Simard, 2010) ; (Auboyer, Brizon and Wybo, 2008).

La question du traitement de l'information dans le management de la sécurité industrielle et des activités à risques, en particulier dans l'évaluation de situations et la communication des décisions est encore un facteur critique comme le souligne H. Roux : « Il serait d'ailleurs souhaitable de développer la connaissance des besoins en information des riverains et du public et de développer les outils correspondants. On a noté à ce sujet l'efficacité en termes de communication des échelles évaluatives mises en œuvre pour caractériser les incidents dans le nucléaire ou même les risques dans le cas de la météorologie. Le couplage entre évaluation des situations, information du public et décision par l'autorité responsable le cas échéant doit, de façon générale, être développé. Les résultats obtenus pour l'information de ceux qui travaillent dans l'exploitation ou habitent à proximité ou encore y exercent une activité, devraient aussi faire l'objet d'évaluations objectives » (Roux, 2004).

Les caractéristiques majeures des décisions relatives au management de la sécurité industrielle que l'on voit déjà apparaître dans ces quelques lignes sont les suivantes :

- Entre le choix d'une action et sa réalisation peuvent s'opérer de véritables boucles de rétroaction dans le temps qui nous conduisent à envisager la décision comme un processus dynamique et non pas comme un acte instantané ;
- Le management de la sécurité est la confrontation de points de vue multiples et critères d'évaluation des situations et solutions potentiellement antagonistes de par le métier et la culture des acteurs impliqués comme par leur fonction ou leur position hiérarchique ;
- Il existe de fortes interactions entre les niveaux décisionnels qui si elles sont mal gérées peuvent être sources d'incohérences et de dysfonctionnements critiques au final ;
- Les décisions relatives à la sécurité industrielle dépassent le seul cadre de l'entreprise. Il est nécessaire de communiquer et de rendre des comptes aux partenaires politiques et institutionnels.

Nous nous proposons donc d'aborder le processus de la décision pour le management de la sécurité industrielle en formalisant les interactions entre les acteurs et les points de vue qu'il existe entre les différents niveaux décisionnels. En s'appuyant sur cette formalisation, nous cherchons à développer dans un premier temps des modèles mathématiques et des outils permettant de gérer les sources d'incohérences et les éventuels décalages (spatio-temporels) entre les directions souhaitées et réelles des faisceaux de décisions. Nous nous intéresserons à l'argumentation et à la justification de décisions, la traçabilité des choix. Chacun des modèles proposés dans les chapitres à suivre aura donc pour objet de formaliser mathématiquement une situation, de l'expliquer, de la rendre interprétable, d'objectiver l'évaluation des

alternatives et par conséquent, les aides informatiques basées sur ces modèles contribueront à réduire les erreurs de la dimension cognitive. Ensuite, nous tenterons de proposer des modèles de pilotage ou de contrôle pour gérer les divergences d'opinions entre les acteurs décisionnaires durant la phase de délibération de la décision. Les aides informatiques basées sur ces modèles contribueront à réduire les erreurs des dimensions collective et opératoire en offrant des outils pour l'orchestration et la coordination de la phase de délibération. Ce découpage fonctionnel de notre système d'aide à la décision, une partie dédiée à la « modélisation du système », puis une partie relevant de « son système de pilotage », nous paraît correspondre à la démarche classique de l'automaticien face au procédé qu'il doit contrôler.

5. Quelles grandeurs choisir pour piloter une décision d'organisation ?

Dans une boucle de régulation de base sur un système technique, on choisit une grandeur à régler et une grandeur perturbatrice pour contrôler la grandeur à régler. On cherche à annuler l'écart qui existe entre la grandeur régulée et la consigne désirée en jouant sur la grandeur réglante. Dans notre cas, le processus dynamique que l'on cherche à contrôler est la délibération, la sortie régulée est la décision ou plutôt une caractéristique de cette décision : choix, fiabilité, stabilité, consensus, vitesse de convergence, etc. Comme nous l'avons mentionné tout à l'heure, la décision dans une organisation est soumise à de fortes interactions entre les niveaux décisionnels qui, si elles sont mal gérées, peuvent être sources d'incohérences et de dysfonctionnements critiques au final. Ces incohérences sont liées à l'écart d'interprétation qui existe d'une même situation à deux niveaux décisionnels ou à l'écart qui existe entre la représentation que l'on se fait de la situation et ce qu'elle est en réalité. C'est donc ces écarts que l'on va s'efforcer de réduire ou du moins de détecter et de mettre en évidence afin que chacun soit conscient de la représentation de l'autre avant d'agir. Ces écarts d'interprétation ont de multiples sources : les acteurs de la décision ne partagent pas nécessairement le même modèle de préférence, ils n'ont pas tous la même connaissance des contraintes de la situation, etc. Ces incohérences sont d'autant plus complexes à gérer qu'il y a d'interactions entre les acteurs ou encore entre les paramètres de la décision (plus le procédé est complexe, plus son contrôle est difficile). Ces interactions peuvent elles aussi avoir différentes natures. Elles peuvent être des interactions au sens de la dépendance physique qui lie deux paramètres ou des interactions préférentielles qui lient deux objectifs ; elles peuvent correspondre à des relations d'influence qui s'exercent dans le réseau social que constitue l'ensemble des acteurs de la décision ou des relations d'influence entre deux caractéristiques du processus de décision. Nous allons donc revenir plus en détail sur ces deux concepts, interaction et incohérence, qui nous paraissent essentiels pour établir nos modèles de décision collective.

5.1 A propos des interactions

Nous ne nous livrerons pas à une analyse bibliographique générale sur la sémantique des interactions (Roy, 2007) ; (Jullien, 2008). Nous voulons simplement pointer les différentes sémantiques que l'on rencontre dans les décisions collectives.

- Tout d'abord, deux dimensions que l'on ne saurait améliorer ou détériorer indépendamment l'une de l'autre interagissent au sens qu'il n'existe pas d'action qui n'affecte pas simultanément les deux critères considérés. Ce type d'interaction naît de l'influence physique simultanée d'une action d'amélioration sur deux critères (Felix, 1994) ; (Felix, 2008). Elle pourrait par exemple être modélisée par des coefficients de corrélation statistiques. Dans tous les cas, il s'agit d'un modèle de comportement du système physique sur lequel porte par exemple l'analyse de sécurité ;
- On peut également choisir de ne satisfaire un critère A qu'à l'unique condition qu'un second critère B le soit également. On exprime cette fois-ci une interaction préférentielle : on exige la satisfaction simultanée des deux critères sans se soucier a priori de la capacité physique à réaliser ces objectifs conjoints. L'interaction préférentielle peut également modéliser une redondance entre deux critères, *i.e.* on se satisferait de la réalisation d'un seul des deux critères si nécessaire (Berrah, Mauris and Montmain, 2008) ; (Sahraoui, 2009) ;
- Il existe naturellement des interactions entre les actions. La plus élémentaire est l'exclusion mutuelle. Autrement dit, il s'agit d'exprimer les relations entre les actions retenues pour améliorer la sécurité industrielle. L'interaction est alors une contrainte structurelle ou opérationnelle entre les actions, indépendamment de toute considération à l'égard des objectifs ;
- Dans le contexte de décision sociotechnique qui nous intéresse, le jeu d'acteurs est un paramètre essentiel de la décision. Une approche dite politique de la décision consiste à mener une analyse qui privilégie le jeu des acteurs, leur capacité à manœuvrer, à produire des coalitions. Le choix fait l'objet de jeux de pouvoirs entre les parties concernées. L'interaction prend ici le sens d'une influence sociale que peut subir un décideur dans un réseau social (Sfez, 1992) ; (Hoede and Bakker, 1982) ; (Grabisch and Rusinowska, 2010) ;
- Enfin, comme nous l'avons déjà évoqué les différentes phases de la décision ne se présentent pas de façon linéaire, mais en boucles : une prise de décision doit se matérialiser par une action, mais la réalisation d'une action peut remettre en cause la décision. Phases d'intelligence, de conception, de sélection et de bilan (Simon, 1977) se succèdent sans logique chronologique préétablie possible. Les phases sont ainsi des « engrenages d'engrenages ». Il est d'usage d'utiliser le terme d'interaction entre l'action et la décision pour désigner les boucles de causalité qui peuvent exister entre elles. Quand il s'agit du contrôle d'un système de production, il est plus difficile de raisonner en termes de causalité. L'interaction relève de la

commande industrielle, historiquement à l'une des théories de la décision de la fin des années 40, la cybernétique de Wiener. Un système cybernétique (Wiener, 1948) peut être défini comme un ensemble d'éléments en interaction, les interactions entre les éléments peuvent consister en des échanges d'informations. Lorsque des éléments sont organisés en un système, les interactions entre les éléments donnent à l'ensemble des propriétés que ne possèdent pas les éléments pris séparément. Ces échanges constituent une communication, à laquelle les éléments réagissent en changeant d'état ou en modifiant leur action. La communication, et la rétroaction sont des notions centrales de la cybernétique et de tous les systèmes d'informations. L'approche cybernétique d'un « système » consiste en une analyse globale des éléments en présence et surtout de leurs interactions. Les éléments d'un système sont en interaction réciproque. L'action d'un élément sur un autre entraîne en retour une réponse (rétroaction ou « feedback ») du second élément vers le premier. Ces deux éléments sont reliés par une boucle de rétroaction. On rejoint aussi l'interaction au sens des systémiciens qui expliquent que l'analyse des sous-systèmes d'un système complexe ne peut se faire isolément parce que chaque sous-système interagit avec les autres (Simon, 1991a).

Le Tableau 1.2 synthétise cette classification des interactions que nous avons rencontrées dans l'abondante littérature autour de l'aide à la décision multicritère et multi acteurs : les *D* désignent les décisions ou objectifs et les *a* les actions. Il existe en revanche moins de travaux qui distinguent et gèrent plusieurs de ces interactions conjointement parce qu'elles relèvent de cultures et d'outils mathématiques différents et qu'elles n'affectent pas les mêmes niveaux décisionnels (Fleurey and Solberg, 2009) ; (Montmain and Labreuche, 2009) ; (Imoussaten et al., 2011a). Nous donnerons un état de l'art spécifique pour chacun des cas utiles à l'élaboration de nos modèles d'aide à la décision. Les approches relevant de la théorie de l'utilité multi attributs (MAUT pour Muli Attributes Utility Theory) vont généralement traiter des relations de subordination et de coordination entre les critères d'évaluation du système, les décisions abordées relèvent d'un raisonnement fondé sur un modèle de préférence. Dans notre champ d'application, ce sont les décisions stratégiques qui s'appuient sur la seule analyse des performances (Tableau 1.2 : Colonne 3) (Sahraoui, 2009). De nouvelles directives ministérielles, de nouvelles normes internationales nécessitent que l'industriel fasse évoluer la sécurité de son installation. Les décisions tactiques et opérationnelles qui consistent à déterminer les actions admissibles qui permettront d'améliorer les performances sécuritaires du système reposent sur des modèles de comportement du système : on s'intéressera alors aux contraintes sur les actions possibles pour identifier les configurations admissibles et à l'influence ou l'impact de ces actions sur les performances (Tableau 1.2 : Colonne 1 et 2) (Felix, 2008). L'industriel doit garantir la stabilité et l'intégrité du système qu'il exploite au regard des normes et tolérances en vigueur. Une adaptation itérative du système est souvent nécessaire pour atteindre les performances sécuritaires imposées par une norme ou un cahier des charges ; il faut alors introduire le temps dans le modèle de décision pour un pilotage du système à travers une boucle de contrôle (Tableau 1.2 : Colonne 5). La Figure 1.7 illustre ces différents niveaux de décision relatifs à la sécurité du système : même si le symbolisme utilisé

dans cette figure est plus proche de ce que l'on utilise en génie logiciel, les boucles cognitives qui y sont évoquées peuvent facilement s'interpréter en termes de boucles de rétroaction de l'automatique. Enfin, à tout niveau peut s'exercer un jeu d'influences entre les acteurs qui décident de la stratégie la plus pertinente, de la mise en œuvre la plus efficace ou du pilotage optimal en matière de sécurité d'un système industriel (Tableau 1.2 : Colonne 4) : les modèles nous semblent dans ce dernier cas relever davantage de la théorie des jeux.

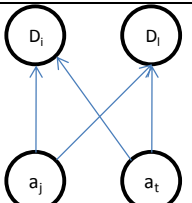
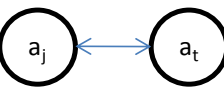
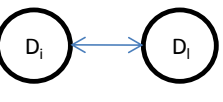
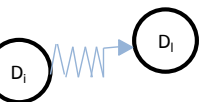
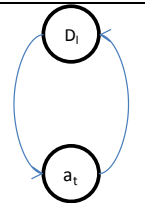
Influence physique	Contraintes opérationnelles sur les actions	Lien de coordination et de subordination entre les décisions	Perturbation des décisions dans un réseau	Boucle de rétroaction entre décision et action
				

Tableau 1.2 : Interactions dans la décision

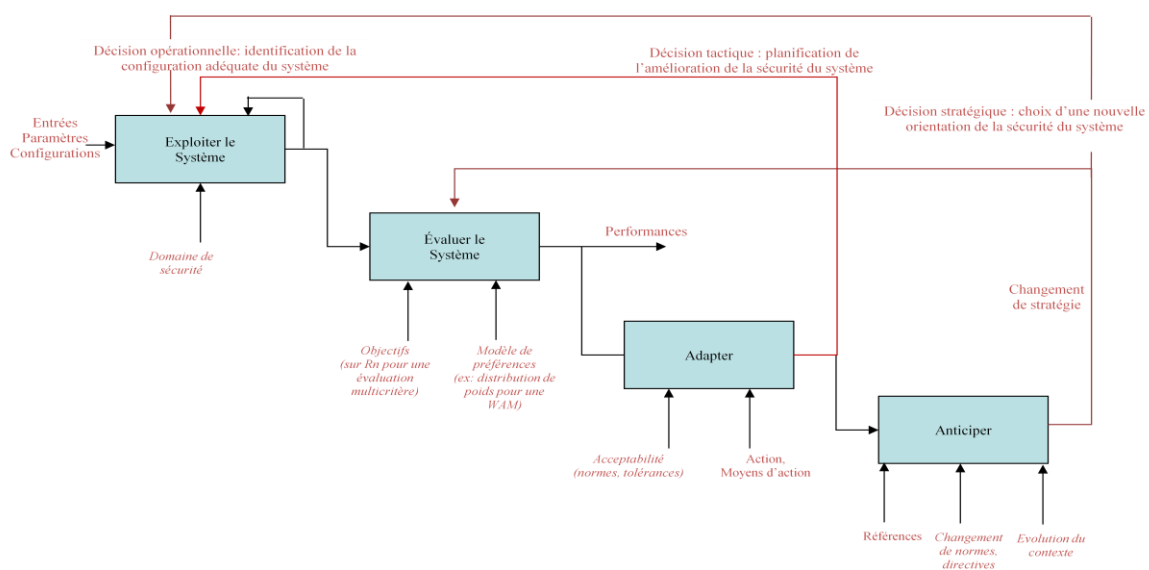


Figure 1.7 : Les différents niveaux de décision dans la gestion de la sécurité d'un système industriel

5.2 A propos des incohérences

Cette section se donne pour objet d'introduire les types d'écarts de représentation, d'évaluation ou d'interprétation, de dissonances cognitives que l'on désignera ici par incohérences, qu'il nous a été nécessaire de distinguer pour modéliser les différentes situations de décisions collectives qui font l'objet des différents chapitres de ce manuscrit. Ces incohérences relèvent de la confrontation de critères antagonistes dans l'évaluation

multicritère de la sécurité d'un système, d'interprétations erronées ou subjectives des données par les acteurs du processus de décision (Berrah et al., 2011), ou encore de conflits d'intérêts ou d'objectifs (Sanchez, 2007) ; (Sanchez et al., 2009).

Si l'on continue notre illustration sur le management des activités à risques, ces dissonances ont déjà été identifiées comme facteurs de danger. (Kervern, 1995) puis (Verdel, 2000) proposent un cadre de réflexion sur les Sciences du Danger, les Cindyniques, du grec *kindunos*, le danger. Kervern dégageait cinq dimensions principales pour la représentation de l'objet « danger » dans sa complexité. Les cinq dimensions correspondant à ces axes sont celles des faits, des modèles, des objectifs, des normes et des valeurs. Chaque situation de danger, nécessite de préciser le champ de l'étude des dangers : limites de temps, d'espace, et liste des réseaux d'acteurs inclus dans l'étude, mais aussi, le « regard » porté sur ce champ. Ce regard-là est porté par référence à ces cinq dimensions différentes :

- La dimension des faits de mémoire de l'histoire ou des statistiques : c'est ce que l'on stocke dans les bases de données des grands systèmes de retour d'expérience ;
- La dimension des représentations et modèles : c'est la base de connaissances qui sert d'appui aux calculs de résistance des matériaux, physique, chimie, mécanismes de propagation (tremblements de terre, inondations, glissements de terrains ...) ;
- La dimension des objectifs : il s'agit pour chacun des réseaux impliqués dans la situation, d'explicitier sa stratégie, le but étant de parvenir à des explications concertées, afin d'éviter des dérives vers des échecs ;
- La dimension des normes : il s'agit des lois, codes et règlements ainsi que des normes, codes de déontologie obligatoires ou de libre adhésion ;
- La dimension des systèmes de valeur : l'évolution et le respect des éléments de l'espace déontologique conduit à cette dimension.

Des conflits, des « fabrications de dangers » résultent de dissonances entre deux ou plusieurs réseaux d'acteurs, évoluant dans la même situation. L'interprétation de la même situation peut différer significativement selon le point de vue, la fonction, les responsabilités, les intérêts d'un acteur donné. Les dissonances entre acteurs peuvent être analysées selon les cinq dimensions.

5.2.1 Critères antagonistes

Concevoir ou améliorer un système de barrières de sécurité optimal suppose que l'on puisse exprimer a priori une fonction *objectif*. En conception, il est rare de pouvoir exprimer les exigences à travers un seul critère. Le coût, l'efficacité sont parmi les critères les plus employés, mais pour des besoins particuliers d'autres peuvent être pris en compte. Or, ces critères sont le plus souvent antagonistes (il est rare que coût faible rime avec grande efficacité). De nombreux compromis seront donc nécessaires pour aboutir au système final afin que les différentes configurations puissent être évaluées et comparées. Dès lors qu'il y a

des critères antagonistes dans l'évaluation de la sécurité d'un système, se pose la question de la définition de l'amélioration du système. Il faut se définir un référentiel qui permette d'établir un ordre sur les alternatives envisageables. La première source d'incohérences est liée au caractère antagoniste des critères et influence le choix même du modèle de préférence selon qu'on autorisera ou non des compensations entre les critères par exemple... Pour éliminer ce premier type d'incohérences, il faut introduire une méthode d'évaluation adéquate pour comparer des alternatives représentées dans un espace multidimensionnel.

Avant l'apparition des méthodes multicritères, les problèmes de décision se ramenaient le plus souvent à l'optimisation d'une fonction économique, constituant l'unique critère de sélection. Cette approche monocritère avait le mérite de déboucher sur des problèmes mathématiques bien posés, mais qui n'étaient pas toujours représentatifs de la réalité. Choisir d'optimiser, c'est implicitement se situer dans une approche à critère unique (Akharraz, 2004). Dès que l'on prend plusieurs points de vue pour juger des conséquences de plusieurs actions, on risque de désigner comme optimale une action différente pour chaque point de vue et, en fin de compte, de ne dégager aucun optimum des calculs. Or, toute la réalité humaine est « à points de vue multiples » (Scharlig, 1985). Les méthodes d'aide à la décision multicritère ont apporté un nouvel éclairage pour gérer des problèmes de décision avec de multiples critères potentiellement antagonistes.

Deux grands courants de pensée se sont développés : les approches « utilitaristes » et les approches « par surclassement ».

D'origine anglo-saxonne, la MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) a pour objet de représenter les préférences du décideur par le biais d'une fonction d'utilité non connue a priori (Fishburn, 1970) ; (Fishburn, 1982) ; (Keeney and Raiffa, 1976). Cette théorie propose une méthodologie structurée conçue pour gérer les relations entre des critères multiples. Elle consiste à interpréter une situation (décrite suivant les cas par une alternative ou par une mesure) en terme de niveau satisfaction sur $[0,1]$ où 0 désigne la pire situation et 1 la meilleure.

La MAUT étudie deux problèmes essentiels :

- quelles sont les propriétés que doivent posséder les préférences du décideur pour être représentables sous une forme analytique ? De façon très résumée, il s'agit de rechercher une fonction g telle que pour toutes les alternatives A et B (A et B sont des profils de performance dans le cadre de notre étude), la relation « A est préférée à B » puisse se ramener à $g(A) > g(B)$;
- comment construire les utilités élémentaires et la fonction d'utilité globale de manière cohérente ?

Les méthodes de surclassement constituent une autre branche majeure du multicritère que l'on peut envisager pour établir une relation de préférence entre deux situations (Roy, 1985) ; (Scharlig, 1985). Elles se basent sur la comparaison deux à deux des différentes situations qui s'offrent à un décideur. Cette comparaison s'effectue en considérant, critère par critère, les

avantages et les inconvénients des situations A et B avant de construire la relation de surclassement : A surclasse B , si A est au moins aussi bonne que B sur une « majorité » de critères sans être « significativement » plus mauvaise relativement aux autres critères. Les notions de « majorité » ou de « significativement » se rapportent au calcul d'indices qui quantifient la dominance d'une situation par rapport à l'autre. On peut ainsi déterminer quelle relation lie les deux alternatives considérées. Il peut s'agir d'une relation d'indifférence, d'incomparabilité ou de préférence.

5.2.2 Subjectivité des interprétations

Une deuxième source d'incohérences provient de la dispersion des mesures ou des opinions d'experts sur la situation de décision, supposées redondantes, mais observées contradictoires. Comment gérer et fusionner l'information contradictoire provenant pourtant de sources expertes ou capteurs dédiées réputées être pertinentes et/ou fiables ? Il s'agit d'intégrer l'ensemble des avis pour prendre la décision sans pour autant perdre l'information sur la disparité d'avis. Il ne s'agit plus nécessairement dans ce cas d'avoir recours à un compromis entre les différentes opinions exprimées, mais plutôt d'avoir recours à des méthodes qui permettent à chacun de se faire entendre et, à force d'argumentation de dégager si possible un consensus, exercice de communication qui prendra la forme d'un débat argumenté. C'est ainsi que ce sont illustrées des méthodes comme la méthode Delphi.

Dans le cadre de l'amélioration de la sécurité d'activités à risques, nous nous intéresserons uniquement à la question de la fusion d'avis d'experts. En effet, la gestion de la fiabilité des capteurs relève d'autres problématiques largement abordées par les automaticiens en réconciliation de données (Ragot et al., 1990) pour les systèmes de contrôle-commande ou en redondance analytique pour le diagnostic (Ding, 2008) ; (Gertler, 1997) ; (Frank, 1996) ; (Isermann and Ballé, 1997). Lorsqu'il s'agit d'êtres humains qui confrontent leur avis, cela relève davantage d'un problème de communication afin que les experts entendent les arguments des uns et des autres et essaient de parvenir à un consensus.

Ce problème peut d'abord être considéré comme un problème de communication entre les experts. La méthode Delphi est un outil de communication et a pour objet de mettre en évidence des convergences d'opinions, de dégager des consensus sur des sujets précis, grâce à l'interrogation d'experts, à l'aide de questionnaires successifs. L'objectif le plus fréquent des études Delphi est d'apporter l'éclairage des experts sur des zones d'incertitude en vue d'une aide à la décision. La méthode Delphi propose probablement l'approche la plus répandue pour aborder la question de la synthèse d'avis d'experts. Elle offre une technique de communication structurée, développée à l'origine comme une méthode systématique et interactive pour la prévision de paramètres, grandeurs, risques, etc. par un groupe d'experts (Linstone and Turoff, 1975). La méthode Delphi est basée sur le principe que les prévisions (ou les décisions) proposées par un groupe structuré d'individus sont plus exactes que celles que fournirait un groupe non structuré d'individus (Rowe and Wright, 2001). Ce type d'analyses appartient aux courants autour de l'intelligence collective (Hiltz and Turoff, 1978) ; (Penalva and Montmain, 2002). Dans la version initiale de la méthode, les experts répondent

à des questionnaires sur au moins deux tours. Après chaque tour, un animateur fournit un résumé anonyme des prévisions des experts du tour précédent ainsi que les arguments et raisons donnés par les juges pour justifier leur choix. Ensuite, les experts sont encouragés à revoir leur jugement antérieur à la lumière des réponses des autres. Il est attendu que la dispersion des réponses diminue au fur et à mesure de l'exercice et qu'un consensus puisse permettre de converger vers la bonne valeur ou la bonne décision. Le processus itératif est stoppé sur un critère défini au préalable (ex : nombre de tours, obtention d'un consensus, stabilité des réponses) et le score (la valeur, etc.) moyen ou médian des dernières opinions collectées détermine le résultat final (Rowe and Wright, 1999).

La méthode Delphi est utilisée avec succès dans la plupart des cas lorsqu'il s'agit de déterminer une grandeur scalaire. Par contre, dès qu'il s'agit de prévisions plus complexes avec de multiples facteurs ou de décisions à critères multiples, elle est souvent mise à mal. En effet, les experts ont tendance à considérer les autres facteurs ou critères ne relevant pas forcément de leur domaine d'expertise comme étant sans effet quant au point sur lequel ils se prononcent. Des extensions de Delphi ont été proposées pour résoudre ce problème, intégrant l'idée que la possibilité d'occurrence d'un événement pouvait changer les probabilités d'autres événements. Nous pensons qu'associer une méthode d'évaluation multicritère à Delphi pour guider les juges dans leurs évaluations croisées est une solution séduisante qu'il s'agisse de méthodes de surclassement type Electre ou de méthodes de la théorie de l'utilité multi-attributs (MAUT) type Macbeth (Bana E Costa and Vansnick, 1997) ; (Bana e Costa, De Corte and Vansnick, 2005) ou AHP (Saaty, 1980) ; (Saaty, 2004). Nous développerons ce point formellement plus tard dans un modèle de fusion d'avis d'experts. Mentionnons pour l'instant, par exemple, les objectifs de AHP. (Saaty, 1980) introduit sa méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) pour conduire le processus de décision lorsque plusieurs critères sont en jeu pour comparer deux alternatives. En fait, AHP est une technique structurée pour aborder des décisions complexes, *i.e.* impliquant plusieurs facteurs décisionnels. Plutôt que de prescrire une décision correcte, AHP se donne pour objet d'aider le décideur à en trouver une qui satisfasse au mieux ses objectifs et sa compréhension du problème : c'est un processus supposé structurer des décisions déjà réfléchies, mais de manière implicite, par un individu. Bien qu'elle puisse être utilisée pour guider des décisions individuelles, AHP s'est révélée particulièrement efficace dans des situations où des équipes complètes travaillent sur des problèmes complexes avec de forts enjeux, et qui impliquent de collecter la perception et le jugement des acteurs (Bhushan and Rai, 2004). Le principe de la comparaison paire par paire de AHP présente de nombreux avantages lorsque d'importants facteurs de la décision sont difficiles à évaluer quantitativement, ou encore lorsque la communication entre les membres de l'équipe est gênée par l'hétérogénéité des spécialisations, des terminologies ou des intérêts. Le point de vue de Saaty sur les objectifs de son approche confirme donc l'intérêt qu'il y a à allier une méthode d'analyse multicritère à Delphi.

5.2.3 Subjectivité du modèle d'évaluation

Le dernier type d'incohérences qui nous semblent affecter les décisions collectives relève des conflits d'intérêts entre les parties prenantes ou d'incompréhensions entre les niveaux opérationnels, tactiques et stratégiques. Il ne s'agit plus comme précédemment d'un

désaccord sur l'interprétation d'une mesure utile à l'évaluation d'une alternative, mais d'une divergence qui porte sur la façon même d'évaluer les alternatives. Le modèle d'évaluation ou le modèle de préférence n'est pas partagé par les différentes parties prenantes. L'objectivité de la fonction d'évaluation des possibles n'est pas reconnue.

Prenons encore l'exemple du management des activités à risques aux niveaux opérationnel et stratégique. Le traitement de l'incertain dans l'évaluation des risques et leur gestion relèvent d'une aptitude à gérer l'imprévisibilité et la dynamique des situations, fondement du management des risques (cf. Figure 1.8). Au niveau opérationnel (triangle supérieur Figure 1.8), le risque est perçu dans son sens le plus commun. Il s'agit de gérer les risques pris par l'industriel quotidiennement lorsqu'il exploite le système technique. Si l'on prend l'exemple d'un système de production, la sûreté de fonctionnement et l'analyse des modes de défaillances du système en particulier permettent d'identifier les différents dysfonctionnements pouvant affecter les performances, la stabilité ou encore l'intégrité du système. A ces résultats d'analyse peuvent être ajoutées des connaissances pour quantifier la gravité des effets et/ou la probabilité d'occurrence de chacun des dysfonctionnements. Les outils de supervision permettent encore de suivre dynamiquement le comportement du système de production et de détecter au plus tôt les dysfonctionnements survenus afin d'en limiter les conséquences (détection précoce), d'identifier les causes de ces dysfonctionnements (localisation et diagnostic) et leurs effets (pronostic) (Montmain and Gentil, 2000). Pour ce type d'analyse, nous parlerons d'analyse de risques techniques. Au niveau décisionnel supérieur, l'analyse des risques ne porte plus sur le système technique lui-même, mais sur l'activité de l'équipe d'exploitation qui agit sur le système technique pour en obtenir des performances. L'analyse se veut donc moins technique que stratégique : l'espace d'analyse s'élargit. Au niveau stratégique, on ne se confine plus au seul système technologique et aux risques techniques qu'il peut présenter, mais on cherche à répondre de l'activité liée à l'exploitation d'un tel système (exploitation des gaz de schistes, énergie nucléaire, etc.). Il s'agit bien de justifier l'intérêt de l'activité industrielle au regard des risques qu'elle peut engendrer à l'égard de critères juridiques, éthiques, etc., auprès de partenaires sociaux, économiques ou politiques. Comme nous l'évoquions plus tôt, les décisions ne relèvent plus ici de l'évidence où l'on se borne à l'analyse de l'installation, mais de la pertinence où l'on contextualise l'activité dans une sphère sociétale toujours plus exigeante et contraignante (Jarrosson, 1994).

Dans ce contexte hiérarchisé de la décision, il nous semble clair que l'opérationnel et le stratège n'ont certainement pas la même vision du système qu'ils exploitent ensemble. Le décideur peut espérer atteindre certains objectifs, l'opérationnel ne peut faire que de son mieux pour les atteindre. L'effectivité de l'exploitation, *i.e.* l'adéquation entre les moyens et les objectifs, n'est pas garantie, et il est alors possible qu'il existe des incohérences entre les attentes des dirigeants et la capacité à les réaliser sur site (Montmain and Labreuche, 2009) ; (Imoussaten et al., 2011a) ; (Imoussaten, Troussset and Montmain, 2011b). Un dialogue est généralement nécessaire si l'on veut définir des objectifs atteignables. Dans ce contexte conflictuel, la négociation devra être étayée d'arguments solides qui pourront si nécessaires

être la base de la communication avec les partenaires extérieurs (Sanchez, 2007) ; (Montmain, Sanchez and Vinches, 2009b) ; (Sanchez et al., 2009).

L'exemple du management des activités à risques nous a permis d'illustrer les incohérences qui peuvent exister dans le système d'évaluation de la sécurité d'un système industriel lorsque les acteurs de la décision n'ont pas les mêmes fonctions hiérarchiques et ne partagent pas un même modèle de la situation.

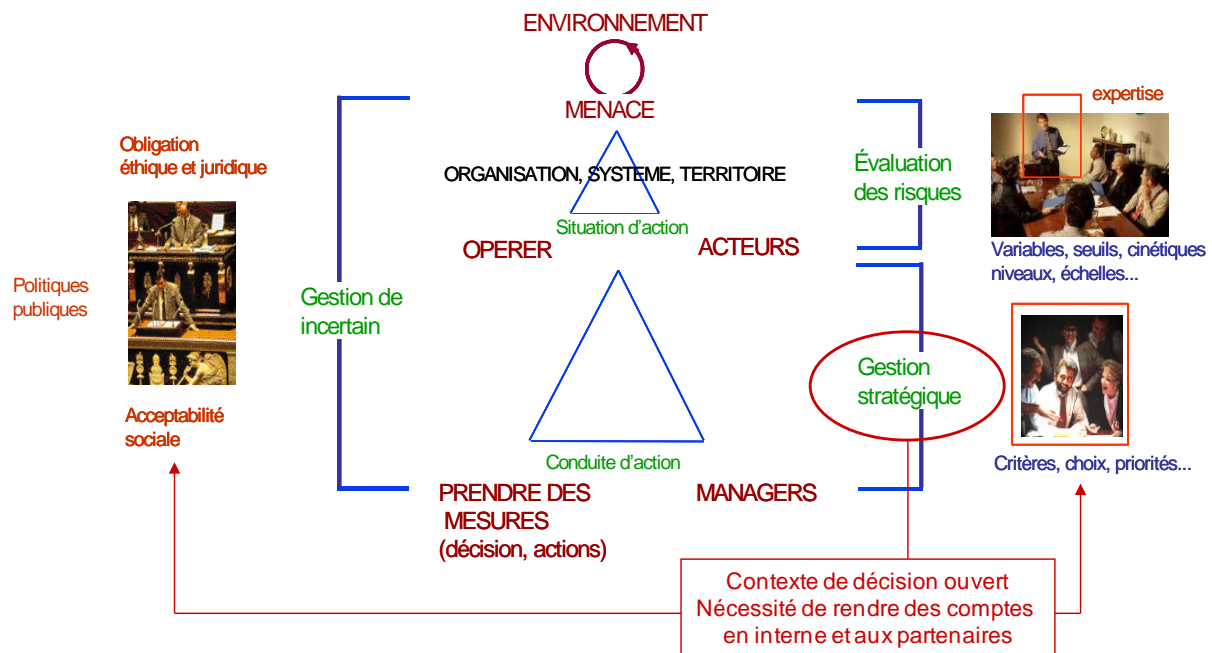


Figure 1.8 : Points de vue opérationnel et stratégique du management des risques

Au-delà des aspects hiérarchiques évoqués précédemment, la résolution collective d'un problème par un groupe d'agents est jalonnée de décisions sur lesquelles les agents doivent encore s'accorder. Les agents doivent se montrer coopératifs pour déterminer efficacement quelle alternative retenir. L'urgence de la situation, les fortes incertitudes caractéristiques de ce type de situations dynamiques complexes laissent place à de forts désaccords entre les protagonistes. Le jeu des acteurs, leur capacité à manœuvrer, à produire des coalitions sont alors autant de facteurs déterminants du processus dynamique de décision collective. On peut alors s'intéresser à l'influence qu'un agent peut avoir dans un réseau social sur le résultat de la décision collective finale.

Nous avons tous fait l'expérience lors d'une discussion d'observer certaines personnes engagées dans un processus de décision collective changer d'avis. Les raisons de ce changement d'avis, en supposant qu'elles ne relèvent pas du pur hasard, peuvent être de différentes natures. La plus naturelle correspond à la simple idée que la personne s'est laissée convaincre par les arguments d'un autre intervenant ou d'une coalition d'intervenants dont elle ne partageait pourtant pas le point de vue initialement, ou bien qu'elle a pu se sentir plus ou moins contrainte pour quelque raison hiérarchique, politique, etc., de suivre l'opinion de cet autre intervenant ou coalition. Elle peut également agir par simple réaction contre un agent

donné ou une coalition, prenant systématiquement l'opinion opposée. Ces phénomènes sont désignés sous le vocable général d'influence dans un réseau sociale (Grabisch and Rusinowska, 2010). La notion d'influence sociale peut alors être abordée par le biais de notions statistiques comme le pouvoir décisionnel d'un individu dans un réseau social, qui de façon très résumée, consiste à évaluer le nombre de fois que la préférence individuelle d'un acteur de la décision coïncide avec la décision de groupe (Hoede and Bakker, 1982) ; (Grabisch and Rusinowska, 2010).

Autre forme du management des activités à risques, la gestion de la décision en cellule de crise est une illustration de ces interactions (projet ANR ISyCri) (Benaben et al., 2008). La crise doit être vue comme l'interprétation d'une situation où l'homme est confronté à un risque imminent ou avéré. Cette interprétation peut être remise en cause de façon événementielle selon l'occurrence de facteurs aggravants ou de complexité. Les acteurs de la cellule de crise doivent faire face à cette adaptabilité du modèle et délibérer efficacement en fonction des informations séquentielles dont ils disposent pour choisir une représentation unique qui leur permettra alors de coordonner leurs interventions. Le chef de la cellule de crise doit savoir piloter efficacement la délibération pour converger vers une décision la plus consensuelle possible, le plus vite possible, l'influence sociale de chaque acteur est liée à sa fonction, sa position hiérarchique autant qu'à ses arguments et à son charisme (Couget et al., 2007).

A titre d'illustration, nous citons encore le lancement de la navette spatiale Challenger en 1986. A la veille du lancement, une réunion a eu lieu entre les supérieurs de deux niveaux distincts dans la hiérarchie de la Nasa, les niveaux 3 et 4. Un expert de la société Thiokol (son entreprise est un client de la NASA), niveau 4, s'oppose au lancement de la navette en argumentant que le risque de déficience des joints des boosters si la température reste aussi basse (35°F) est trop important. Le niveau 3, représenté par les responsables de deux des trois centres de commandement (Marchal et Kennedy) du lancement de la navette, ne veulent pas reporter le lancement pour d'évidentes raisons politico-économiques. Malgré l'argumentation technique du niveau 4, l'influence statutaire des représentants du niveau 3 l'a emporté (Jezequel, 1991a). La catastrophe de Ténérife est un autre exemple où les arguments de l'ingénieur de la KLM n'ont pu modifier la décision d'un commandant de bord chevronné (Jezequel, 1991b).

5.3 Explication et argumentation de décisions

Nous pensons que l'un des objectifs majeurs d'une aide au raisonnement pour les décisions multicritères et multi acteurs réside dans la formalisation des processus d'échange d'informations. Cette formalisation doit constituer en effet un support partagé par les acteurs de la décision pour argumenter et négocier leurs points de vue, communiquer les décisions. L'aide à la décision ne saurait alors se situer dans une logique d'optimisation au sens classique du terme parce que la pluralité des acteurs rend caduque la notion même d'optimum (voir la section précédente sur les incohérences). Il s'agit davantage de proposer un support

formel ou mathématique aux logiques de décision qui s'affrontent afin que chacun puisse s'expliquer (Montmain, 2005) ou argumenter sa position (Amgoud and Prade, 2009) ; (Bourguet, Amgoud and Thomopoulos, 2010) ; (Belabbès, 2007). La formalisation des processus décisionnels doit ainsi rationaliser la confrontation d'avis experts.

Par ailleurs, comme nous l'avons déjà mentionné, la politique de sécurité industrielle, par exemple, dépasse les murs de l'installation, puisque l'industriel doit rendre des comptes et communiquer sur ses actions. La justification de cette politique permet de faire remonter les raisons des choix arrêtés à chaque niveau décisionnel, d'assurer la traçabilité de la politique auprès de la direction générale, des partenaires économiques, institutionnels et politiques, des autorités civiles, etc. La trace des logiques de décision doit être utilisée pour restituer aux autorités techniques ou politiques, l'argumentaire scientifique qui aura permis de retenir une option plutôt qu'une autre sur la base d'avis d'experts.

La représentation des préférences que propose l'agrégation multicritère offre une forme analytique facilement utilisable dans des problématiques d'optimisation multicritère et de justification. Un principe simple de justification des préférences et donc des décisions est en effet basé sur la contribution des critères à l'évaluation globale d'une alternative (Montmain, Mauris and Akharraz, 2005) ; (Labreuche, 2009). L'idée est de proposer une explication de la logique de décision en identifiant les critères qui ont eu un rôle prépondérant dans le classement des options retenues pour améliorer la sécurité d'un site industriel. Cette justification confère au modèle une capacité explicative qui doit permettre à tout moment de démontrer la transparence des évaluations en proposant les éléments d'information qui soutiennent la logique décisionnelle appliquée. Le principe repose sur une analyse de sensibilité de l'opérateur d'agrégation (Sanchez, 2007). La différence des évaluations globales attribuées à deux options est réécrite, lorsque l'opérateur d'agrégation le permet, sous la forme d'une somme de termes chacun fonction d'un seul critère : plus la contribution d'un critère à cette différence est significative, plus le critère a joué un rôle prépondérant dans la décision. Cette façon de procéder évoque le principe d'une analyse par composantes principales et nous semble assez intuitive pour le décideur.

Les études mentionnées dans ce paragraphe sont assimilables à des analyses de sensibilité lorsque les évaluations sont quantitatives et précises. Comme nous le verrons dans ce manuscrit, il ne faut pas confondre justification a posteriori et argumentation. (Denguir-Rekik, 2007) a également étendu ce principe lorsque les scores des alternatives sont des nombres flous et que l'opérateur d'agrégation est une intégrale de Choquet (modèle incluant bon nombre de comportements décisionnels selon son paramétrage et sur lequel nous reviendrons dans ce manuscrit). Les auteurs de (Jullien et al., 2006) ont défini l'influence symbolique d'un critère sur la décision finale. Ils partent du principe que dans bon nombre de cas, les acteurs d'un processus de décision expriment leurs jugements sur des échelles discrètes plutôt que d'attribuer un score sur une échelle numérique. Les auteurs se réfèrent à (Grabisch, 2006) pour les conditions d'existence et la construction de l'opérateur d'agrégation moyenne sur des échelles d'évaluation discrète, puis ils proposent de déterminer quelle est l'influence d'un critère ou d'un groupe de critères dans la décision de chaque juge.

Notons que l'explication repose sur l'analyse du modèle d'agrégation. Elle lui est donc propre. Si l'on change de modèle, on risque de changer le classement et l'analyse de sensibilité mise en œuvre pour la phase de justification : la rhétorique d'une sélection ne vaut que pour un modèle de préférence donné. Il est donc nécessaire que la légitimité ou l'objectivité du modèle choisi ne soit pas discutable, mais un fait établi... Si la discorde porte sur le modèle de préférence (troisième type d'incohérences, section 5.2), on peut imaginer faire une analyse de sensibilité sur les paramètres du modèle comme on le pratique systématiquement en automatique.

Cette fonctionnalité d'aide à la légitimation souligne l'idée qu'un système d'aide à la décision doit avant tout permettre d'éclairer le décideur au cours des phases du processus décisionnel : l'aide à la décision ne relève que de façon très partielle de la recherche de vérité ; les théories, les méthodologies, les concepts, les modèles, les techniques sur lesquels elle s'appuie doivent avoir une ambition différente : raisonner le changement que prépare un processus de décision de façon à accroître la cohérence des objectifs avec le système de valeurs du décideur (Roy, 1985).

6. Quels enseignements pour nos modèles de décisions collectives ?

De nombreuses décisions concernant les systèmes sociotechniques (par exemple, une installation à risques industriels dans son contexte social) que nous avons évoqués mettent en scène un collectif d'acteurs ayant chacun leur domaine d'expertise et leurs actions. Ces décisions relèvent de différents niveaux d'abstraction. Les décisions opérationnelles qui consistent à garantir la fiabilité du système en contrôlant que les observables du système soient maintenus dans une plage de fonctionnement donnée. Les décisions tactiques qui consistent à faire en sorte que les sorties du système atteignent les objectifs espérés. Enfin, il y a les décisions stratégiques qui permettent d'anticiper les évolutions de normes, de directives ou encore les changements de contexte et qui peuvent exiger de changer de référentiel d'évaluation (Figure 1.7 ; Figure 1.8 ; Figure 1.9). Ces trois niveaux de décision mettent en jeu de nombreux critères d'évaluation et d'encore de plus nombreuses actions d'amélioration potentielles.

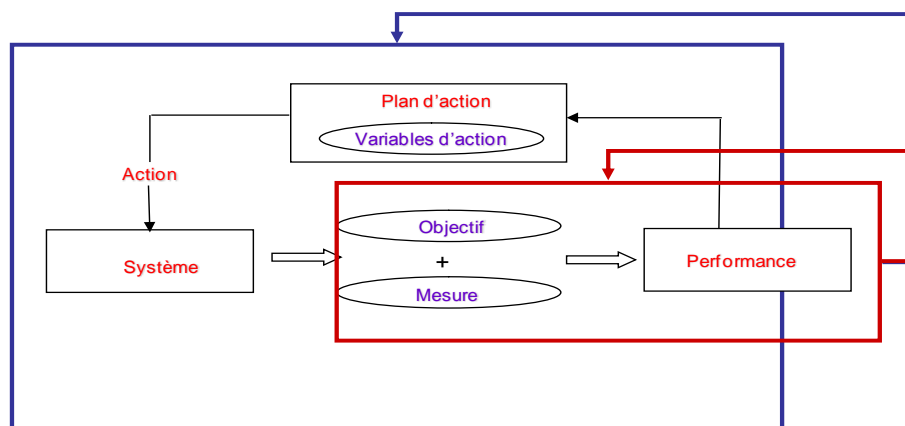


Figure 1.9 : Différents niveaux de pilotage

Actions et performances sont liées par différentes relations qui relèvent d'une part de contraintes physiques sur le système, d'autre part de la stratégie de l'industriel (voir section 5.1) (Figure 1.10). A titre d'illustration, les normes ou directives européennes constituent une expression des exigences au niveau de l'état ou de l'Europe, l'industriel a ensuite sa politique ou stratégie de mise en œuvre qui peut être vue comme un raffinement des exigences : parmi l'ensemble des améliorations possibles pour se conformer à la réglementation, toutes ne sont pas équivalentes pour l'industriel, il a des préférences qui s'inscrivent mieux à l'évolution du management de la sécurité industrielle dans son entreprise.

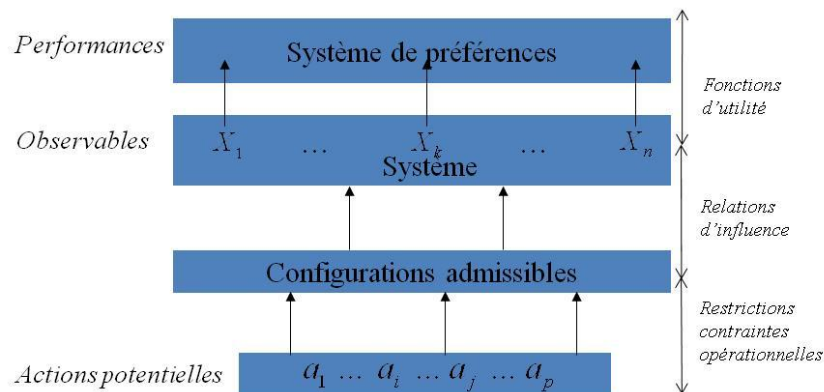


Figure 1.10 : Contraintes et préférences, actions et performances

Un projet de conception, d'adaptation ou d'amélioration d'un système complexe nécessite que modèles de comportement et modèles de préférence sur le système cohabitent : il est donc nécessaire de connaître les contraintes des actions entre elles (cahier des exigences, contraintes de fonctionnement, etc.), l'influence des actions sur les performances, mais aussi les relations de coordination et de subordination qui peuvent exister entre les critères de la sécurité (Figure 1.10). Comme nous l'avons expliqué dans la section 5.1, il nous paraît utile de bien distinguer les sémantiques de ces différentes interactions parce qu'elles correspondent à des connaissances qui ne sont pas détenues par les mêmes niveaux décisionnels. Ainsi, paraît-il peu probable qu'un décideur dans son bureau du siège à Paris sache comment réduire le taux des accidents de maintenance sur l'un de ses sites de province alors qu'en revanche il sait qu'il s'agit là de l'amélioration nécessaire à sa certification. Par contre, l'usine de province est, elle, capable d'imaginer des solutions techniques ou organisationnelles pour réduire ce taux si la direction lui demande d'en faire sa priorité. Les décisions sont distribuées aux niveaux tactiques, organisationnel et stratégique et ne s'appuient pas sur la même connaissance de l'entreprise et de son environnement. Comme nous l'avons expliqué dans la section 5.2, cette connaissance distribuée et compartimentée peut être la source d'incohérences à la fois dans la conception du projet d'amélioration de la sécurité et dans sa mise en œuvre.

Une autre difficulté réside dans la connaissance imprécise que l'on peut avoir des paramètres de ces modèles d'interactions lorsqu'il s'agit d'un système complexe : il paraît bien difficile de donner un gain quantitatif entre une formation plus poussée du personnel de maintenance et une diminution du taux d'accidents... la connaissance prendra plutôt la forme suivante :

une formation plus poussée du personnel de maintenance impactera significativement le taux d'accidents ou bien *une formation plus poussée du personnel de maintenance a de fortes chances d'impacter le taux d'accidents*. Autrement dit, l'effet d'une action sur la performance sécuritaire sera décrit soit comme un impact qualitatif soit comme une influence non certaine.

Enfin, une décision d'organisation concerne plusieurs métiers et plusieurs niveaux fonctionnels et hiérarchiques. Qu'entend-on par décision collective dans notre contexte ? Et plus généralement par intelligence collective ?

Nous prendrons comme cas général une situation cognitive dans laquelle l'acteur est pluriel et peut être organisé en deux niveaux :

- l'équipe, groupe où les membres construisent un référentiel opératif commun des actions qu'ils entreprennent ;
- l'organisation, le collectif finalisé, dont les membres partagent des objectifs communs, mais construisent leurs propres représentations et opposent leurs stratégies décisionnelles.

Nous considérerons comme « passages à la limite » les cas où l'acteur est un individu (intervention de mécanismes non intentionnels) ou un collectif (dont les membres ne partagent qu'une culture commune et ne construisent que des principes d'action) (Penalva, 1997).

Dans le cas général, le groupe se distingue de l'organisation en ce que tous les membres sont en interaction dans l'action. Groupe et organisation supposent de chaque acteur des activités orientées vers les autres (négociation, reformulation, argumentation...) et des activités collectives (délibération, construction de références communes...), mais toutes fondées sur la construction de représentations partagées (Teulier-Bourgine, 1997). Le cas d'un collectif qui désire intervenir sur la façon dont il agit dans une situation, et, en quelque sorte, observe donc sa propre action, revient bien à considérer le collectif comme un sujet-collectif individualisé (Andreewski, 1998) et intelligent : comme le signalait Jacques Pitrat, « tout système intelligent peut et doit observer son propre comportement dans l'action », cette auto-référence étant la condition de son autonomie. Il paraît donc légitime d'instrumenter un référentiel des savoirs et expériences utiles à la décision en s'inspirant du processus de cognition individuelle, mais en gardant à l'esprit une différence importante : si l'on peut à la limite créditer l'individu impliqué dans l'action d'une rationalité instrumentale (recherche de l'adéquation fin/moyens) avec un recours minimal à un espace mental, l'intervention en situation complexe d'un collectif organisé nécessite une rationalité cognitive fondée sur l'adéquation entre les informations possédées et les représentations adoptées.

Cette définition proposée par les sciences humaines et sociales est à la base de la typologie des modèles que nous proposons.

Lorsqu'il s'agit de définir un projet de conception ou d'amélioration d'un système sociotechnique, il y a des objectifs stratégiques à définir, puis une réalisation de ces objectifs à planifier. Ces deux points ne sont pas analysés à un même niveau décisionnel de l'entreprise

: les stratégies vont analyser leurs systèmes d'indicateurs de performance (Clivillé, 2004) (tableaux de bord), artefacts synthétiques de l'entreprise, et les opérationnels vont s'attacher à répertorier l'ensemble des moyens d'action à leur disposition pour réaliser les nouveaux objectifs sécuritaires. Il s'agit donc typiquement d'un comportement d'organisation, les acteurs de la décision partagent des objectifs communs, mais construisent leurs propres représentations et opposent leurs stratégies décisionnelles, l'une stratégique, l'autre opérationnelle (Montmain and Labreuche, 2009) ; (Imoussaten et al., 2011a). Il s'agit en particulier de bien gérer toute incohérence qui résulterait d'une confrontation désordonnée.

Si l'on s'intéresse alors seulement aux seules décisions de mise en œuvre, autrement dit au choix des actions qui sont supposées répondre au mieux aux objectifs fixés par la direction, la couche opérationnelle de décision peut être vue comme un groupe qui se construit un référentiel opératif commun des actions à entreprendre. Là encore, on peut distinguer plusieurs cas de figures. Soit on considère que les acteurs opérationnels construisent a priori ce référentiel opératif, ce qui revient à mettre en commun toutes leurs connaissances avant d'engager une action collective et de pouvoir ainsi espérer déterminer celle qui leur apparaît objectivement optimale. C'est un modèle de décision d'organisation où la planification conserve encore une place privilégiée (vision de Simon de la décision d'organisation—voir section 1) (Imoussaten et al., 2011a). Soit on considère que le référentiel opératif se construit au fur et à mesure que l'action prend forme : chaque membre du groupe apporte sa contribution lorsqu'il juge son intervention ou sa connaissance nécessaire, il n'y a pas d'organisation de la connaissance et de l'action a priori, l'une et l'autre se construisent parallèlement et dynamiquement (vision de March de la décision d'organisation—voir section 1). Ce dernier modèle laisse envisager une représentation des membres du groupe comme des agents autonomes qui collaborent ou coopèrent pour atteindre les objectifs arrêtés par la direction. Nous avons décliné plusieurs modèles sur cette idée, l'un basé sur la théorie de l'argumentation pour modéliser une négociation argumentée (Imoussaten, Troussset and Montmain, 2011b), l'autre sur la modélisation dynamique d'un débat pour montrer le rôle de l'influence sociale sur l'issue de la décision (Imoussaten, Montmain and Rigaud, 2009a) ; (Imoussaten, Montmain and Rigaud, 2009b) ; (Imoussaten et al., 2010) ; (Imoussaten et al., 2011).

Dans les modèles de décisions que nous avons évoqués ci-avant, les membres du groupe coopèrent ou collaborent, ils ont certes des compétences et des savoirs propres, mais ils ont des positions symétriques dans l'action collective construite sur une même représentation (statique ou dynamique). Dans l'organisation, il en va tout autrement puisque la situation de négociation entre les niveaux stratégiques et opérationnels attribue cette fois-ci des positions hiérarchiques différentes aux membres du collectif, leurs rôles sont complémentaires, c'est la confrontation de deux représentations supposées être nécessairement complémentaires. Les contraintes de l'opérationnel peuvent remettre en cause les objectifs stratégiques et donner lieu à des solutions non effectives. On peut enfin imaginer que le groupe stratégique se réduit à un individu unique. Il est le seul à connaître (ou à imposer) les objectifs et leurs liens de coordination ou de subordination, les autres acteurs de la décision ne sont là que pour renseigner et enrichir cette représentation. Les protagonistes de ce type de décision ont des

rôles clairement asymétriques : il y a un stratège unique (comme dans l'hypothèse du modèle rationnel de décision —voir section 1) et des experts qui lèvent autant que possible les ambiguïtés qui affecteraient la représentation du stratège. Dans ce cas, il ne s'agit plus de débattre ou de négocier, mais de fusionner l'avis d'experts pour prendre la décision la plus fiable possible (Denguir-Rekik, Mauris and Montmain, 2006) ; (Denguir-Rekik, Mauris and Montmain, 2009) ; (Denguir-Rekik, 2007).

En dernier lieu, il ne faut pas oublier le besoin de garder une trace des logiques de décision afin de pouvoir restituer les explications ou les arguments qui ont conduit à sélectionner une solution plutôt qu'une autre.

La Figure 1.11 introduit une typologie des modèles que nous proposons pour aider une organisation à prendre des décisions relatives, par exemple, à l'amélioration de la sécurité d'un système industriel ou encore à gérer une crise. Ces modèles sont alors autant de propositions pour constituer une boîte à outils pour une ingénierie de la décision collective et qui pourrait être destinée, par exemple, à doter un industriel d'un support mathématique et informatique pour les décisions relatives à l'amélioration de la sécurité de son installation (Hollnagel, Woods and Leveson, 2006).

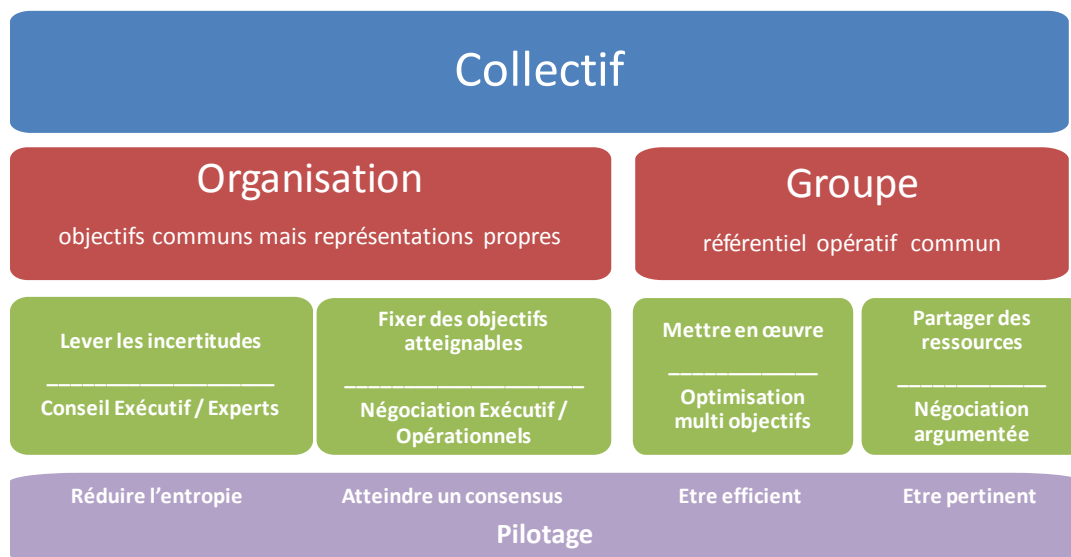


Figure 1.11 : Typologie des décisions pour la conception et la mise en œuvre d'une amélioration de la sécurité industrielle

L'objectif final de ce projet de recherche est de doter chaque maillon de la chaîne décisionnelle de la capacité à percevoir, signaler et contrôler d'éventuelles incohérences afin de contribuer à améliorer une caractéristique de la décision collective. Piloter la délibération consiste à analyser et réduire les écarts entre points de vue, représentations et observations, objectifs et performances, etc. Cela pourrait notamment permettre de favoriser la capacité d'adaptation du système décisionnel vis-à-vis des changements se manifestant au cours du temps et/ou au sein de l'organisation.

Chapitre 2.: Fusion d'avis et pilotage de la délibération

1. Introduction

Un décideur est, en général, entouré de plusieurs experts qui le conseillent dans ses choix stratégiques. Ces derniers ont cependant des points de vue qui peuvent différer voire être contradictoires. Par conséquent, le décideur a besoin de gérer au mieux le débat dans le groupe d'experts qu'il a convoqué : il s'agit de diminuer, aussi vite que possible, les sources d'incertitudes qui l'empêchent de prendre une décision sûre. L'idée de base est d'arriver à focaliser les discussions sur les critères majeurs de la décision du point de vue du décideur pour lesquels des points de divergence sont apparus. C'est dans cette optique que se situe le travail présenté dans ce chapitre puisqu'il cherche à fournir un modèle de pilotage de débat qui guide le décideur dans la consultation des experts. Le travail de ce chapitre s'intègre dans le cadre du projet ANR ISyCri (<http://w3.univ-tlse1.fr/ceriss/soc/isycr/>).

Pour répondre à cette problématique, ce chapitre propose un modèle basé sur le principe de la méthode Delphi associée à un modèle relevant de la théorie de l'utilité multi-attributs MAUT. En effet, la méthode Delphi propose de diriger le débat en lançant des discussions sur toutes sources d'incertitudes et la MAUT permet de modéliser l'importance relative des critères. L'association des deux permettra d'identifier les critères d'évaluation ayant un fort impact sur la décision finale et pour lesquels des points de discorde ont été soulevés. Ce résultat est utilisé pour tenter de réduire l'incertitude liée à la dispersion d'avis des experts et accélérer le processus de prise de décision en focalisant les discussions sur les critères importants et sujets de discorde.

L'approche proposée dans ce chapitre soulève cinq questions :

- La première concerne la représentation de l'incertitude qui entache les avis des experts ;
- La deuxième est liée à la synthétisation des avis de tous les experts sur un point de discussion donné (un critère d'évaluation) ;
- La troisième est la recherche d'un indicateur permettant de représenter la dispersion entre les avis sur ce point de discussion ;
- La quatrième concerne une deuxième synthétisation de l'information qui affecte à chaque option de la décision une évaluation globale en fonction des préférences du décideur ;
- La dernière est relative à l'organisation du débat d'experts pour lever les incertitudes sur les critères les plus discriminants.

Contrairement aux méthodes classiques d'aide à la décision où la fusion des avis s'opère généralement sur un tour, il s'agit dans cette approche de développer un modèle de fusion d'informations, qui tienne compte de l'aspect dynamique du débat d'experts : le modèle en question devra donc formaliser le processus de décision collective et pas seulement l'étape ultime du choix.

Formaliser le processus de fusion d'avis d'experts, gérer l'incertitude et/ou l'imprécision des avis d'experts et réduire les incertitudes sur les avis exprimés via le débat sont des fonctionnalités de notre SIADG qui contribuent à diminuer les erreurs d'évaluation pouvant affecter la décision. La gestion d'avis contradictoires permet de détecter les évaluations non pertinentes, les jugements inopportuns, et réduit ainsi les erreurs d'intégration. Enfin, gérer la dispersion des avis exprimés pour orchestrer les interventions des experts durant la phase de délibération permet de réduire les erreurs de coordination.

Ce chapitre est organisé de la manière suivante. Après une description du principe général dans la section 2, la section 3 est consacrée à un rappel concernant les notions de logique floue nécessaires à notre approche. La section 4 présente un rappel sur certaines méthodes de fusion et des indicateurs d'analyse pour ces fusions. La section 5 est consacrée à un rappel sur les méthodes d'agrégation. La section 6 présente le modèle que nous proposons pour répondre à la problématique. Enfin, une illustration du modèle sur un exemple concernant la décision en cellule de crise, est présentée dans la section 7, suivie par une conclusion.

2. Principe général

Le problème de décision présenté ici a pour objectif, sur chaque tour du débat, de fusionner les connaissances des experts sur les critères importants de la prise de décision et de prendre en compte les préférences du décideur. Il correspond à la configuration identifiée en conclusion du Chapitre 1 où un stratège unique cherche à gérer au mieux les recommandations que lui délivrent les experts qui le conseillent. Cet acteur unique est supposé connaître les priorités et fixer la stratégie. Les autres acteurs ou experts s'accordent sur l'objectivité du modèle de préférence du stratège ou bien n'ont pas lieu de remettre en question son autorité. Ils se contentent de donner leurs avis sur les dimensions de la décision qui concernent leur domaine d'expertise. Ainsi, la décision de groupe est dans cette configuration vue comme un problème de fusion d'avis d'experts.

Le processus de décision concerné par notre approche (par exemple, la résolution d'une crise ou l'amélioration d'une barrière de sécurité...), fait intervenir les éléments suivants :

- Le décideur (le stratège) que les experts conseillent. C'est lui qui donne la stratégie de choix dans l'évaluation des alternatives ;
- Un ensemble Al de l alternatives possibles $Al = (Al^{k=1,l})$. Il correspond à un ensemble de solutions, d'options, objets, etc., au sein duquel le décideur choisira la solution à son problème ;
- Un ensemble C de n critères $C = (c_{i=1,n})$. Il est associé à l'ensemble des objectifs ou performances à atteindre ou satisfaire. Chaque alternative est distinguée par le degré de satisfaction relativement aux critères d'évaluation de la décision. L'espace d'évaluation d'un critère c_i est noté X_i ;

- Un ensemble E de r experts ($E = (E^{j=1,r})$) qui évaluent chaque alternative Al^k par rapport aux n critères, mais qui ne se prononcent que sur les critères relevant de leur domaine d'expertise ;
- Un ensemble $\mathbb{K} := \{x_i^{j,k} / 1 \leq k \leq l, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq r\}$ des connaissances des experts. Un élément $x_i^{j,k} \in \mathbb{K}$ signifie qu'il existe un expert $j \in \{1, \dots, r\}$ qui a donné un avis $x_i^{j,k}$ sur l'alternative Al^k par rapport au critère c_i . Il faut noter que les avis ne sont pas forcément de même nature pour tous les critères.

Le problème mathématique de ce processus de décision est la fusion des avis d'experts. La fusion traitée dans ce chapitre concerne la fusion d'informations de sources différentes dans un contexte d'aide à la décision multicritère et multi acteurs. Dans notre cas, il s'agira d'avis d'experts, mais le modèle que nous proposons pourrait tout aussi bien s'appliquer à la fusion de données issues de capteurs. La fusion d'informations consiste à combiner des avis issus de plusieurs sources dans l'objectif d'aider le décideur à prendre une décision plus fiable qui tienne compte de l'ensemble des avis reçus.

Dans notre cadre de la décision multicritère et multi acteurs, la fusion s'opère sur deux niveaux. Le premier niveau de fusion consiste à synthétiser l'information fournie par les experts sur un critère donné. Le second niveau consiste à attribuer une évaluation globale à l'alternative analysée sur la base des évaluations partielles obtenues par cette alternative sur l'ensemble des critères. On se place délibérément dans un schéma d'agrégation de scores et non pas de préférences : une expertise est souvent consacrée à un objet d'analyse unique dont on évalue la pertinence pour un objectif donné plutôt qu'à une analyse comparative de plusieurs alternatives qu'un expert ne saurait toutes connaître avec la même précision (un expert français du procédé de vitrification de La Hague sera intarissable sur les propriétés du pot de fusion utilisé, sur la qualité de la matrice de verre, mais il ne pourra faire preuve de la même finesse d'examen pour les verres japonais, américains ou russes et encore moins pour ceux de l'Inde où la technologie démarre). Les deux fusions impliquées dans notre approche sont différentes car elles n'ont pas la même sémantique. Dans la première étape, il s'agit de chercher les valeurs possibles d'un critère par rapport à une alternative sur la base des avis des experts et éventuellement de détecter des conflits entre des personnes réputées d'excellence sur le sujet. La seconde étape consiste à ce que le décideur adopte une stratégie de fusion en fonction des priorités que les autorités scientifiques ou politiques ont établi (donc plus orientée sur la sémantique de l'opérateur mathématique qui réalisera la fusion). Dans la suite, l'appellation de *fusion* sera consacrée à la fusion de la première étape, la deuxième fusion sera appelée *agrégation*.

Formellement, soit \mathcal{F}_i , $i \in \{1, \dots, n\}$, une méthode de fusion sur le critère c_i . Elle associe une représentation synthétique à un ensemble d'avis sur le critère c_i . En particulier, si $X_i^k \subseteq \mathbb{K}$ est l'ensemble des avis des experts sur l'alternative Al^k par rapport au critère c_i , $\mathcal{F}_i(X_i^k)$ est alors la synthèse des avis des experts sur l'alternative Al^k par rapport au critère c_i . Par ailleurs, l'approche multicritère consiste à introduire un opérateur d'agrégation, noté \mathcal{G} pour

affecter une évaluation de synthèse à chaque alternative en fonction des avis obtenus sur tous les critères et des préférences du décideur : $\forall k \in \{1, \dots, l\}, \mathcal{G}(Al^k) = \mathcal{G}(\mathcal{F}_1(X_1^k), \dots, \mathcal{F}_n(X_n^k))$.

Les avis d'experts ont malheureusement pour spécificité d'être entachés d'imperfections. La nature des imperfections est liée à l'incertitude relative à l'interprétation de données brutes par plusieurs experts, à l'imprécision des évaluations de chacun des experts. Le schéma de la Figure 2.1 synthétise les différentes sources d'imperfections qui peuvent affecter les connaissances dont dispose un expert sur un système donné.

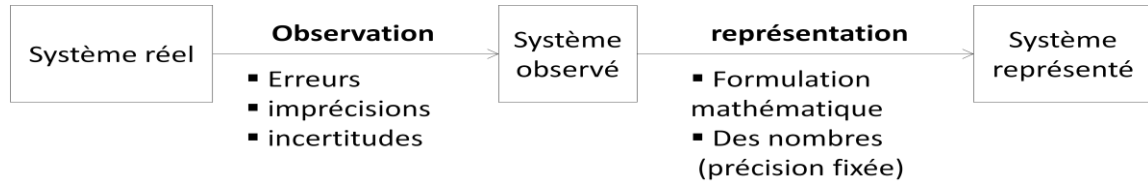


Figure 2.1 : Perte d'information par rapport au système appréhendé (Bouchon-Meunier, 1995)

Dans notre approche, le cadre de la logique floue est utilisé pour représenter l'information car il permet de tenir compte des imprécisions et des incertitudes dans la représentation des informations.

Les opérations de fusion considérées devront tenir compte de ces imperfections et les considérer comme partie intégrante des informations : elles devront donc avoir recours à une représentation des données adéquate qui n'élimine pas ces imperfections, mais au contraire les propage à l'incertitude sur la décision finale. Il est très important de fournir au décideur une information sur la qualité des avis qui ont été utilisés dans chacune des étapes du processus de fusion. Cela lui permet d'avoir une idée sur le risque encouru en choisissant une alternative plutôt qu'une autre et les origines de l'incertitude. Il pourra alors procéder à une rétrospection et demander aux experts qui sont à l'origine d'une incertitude, de revoir leurs évaluations ou d'expliquer pourquoi de telles divergences ont pu être constatées. La solution recherchée à ce problème de fusion consiste à définir une représentation des imperfections qui permette de ne pas faire disparaître l'entropie inhérente au processus d'évaluation des alternatives afin que le décideur soit à chaque instant conscient du risque qu'il prend à choisir une alternative alors que les experts ne peuvent être plus précis sur tel ou tel point de l'évaluation ou bien que ceux-ci ne partagent pas le même point de vue sur cette évaluation. Par ailleurs, la représentation choisie doit être suffisamment explicite pour que le décideur sache comment utiliser le calcul d'incertitudes afin d'organiser la délibération des experts et parvenir à une décision plus sûre.

Ce processus requiert trois étapes majeures. La première consiste à ce que l'opérateur de fusion d'information \mathcal{F}_i garde le maximum d'informations sur les avis depuis leur donnée initiale jusqu'à leur formalisation. La deuxième introduit un indicateur qui permet de quantifier cette incertitude par rapport à un critère donné par le biais d'une analyse de sensibilité. La troisième consiste à déterminer les sources d'incertitude les plus importantes à l'aide d'un opérateur d'agrégation \mathcal{G} qui prend en compte l'importance des critères.

La littérature est riche de méthodes qui proposent des techniques d'aide à la décision multicritère appliquées à la fusion d'avis d'experts (Dubois and Prade, 1986a). Ce sont souvent des méthodes qui, pour avoir été conçues pour des sources d'information imprécises et hétérogènes, se transposent naturellement à la fusion d'avis d'experts. L'évaluation globale des alternatives requiert deux types de combinaisons : un problème d'agrégation multicritère, et la fusion des avis d'experts sur un critère donné. Les auteurs de (Dubois et al., 2001) expliquent que l'on peut procéder de différentes façons : (i) on peut d'abord s'intéresser à l'obtention de l'évaluation globale de chaque expert, puis fusionner ces évaluations ; (ii) on peut d'abord fusionner les avis d'experts pour chaque critère, puis agréger ces évaluations partielles pour calculer un score global. Sachant qu'un expert n'intervient que sur ses domaines de compétences, il n'est pas possible d'obtenir l'évaluation globale de l'alternative à partir d'une seule source donc nous sommes naturellement orientés vers la solution (ii).

La fusion s'opère généralement en un tour : on suppose disposer de tous les avis à un instant donné et que le choix collectif n'a pas d'effet rétroactif sur l'avis de chacun des experts. Dans notre cas, le modèle de fusion d'information doit, en plus, tenir compte de cet aspect dynamique du débat d'experts : notre modèle devra donc modéliser aussi bien le processus de décision collective que l'étape ultime du choix.

C'est pour ces raisons que la méthode Delphi a été évoquée dans le chapitre précédent car elle aborde la question comme un problème de communication entre les experts et propose de diriger leur débat dans le temps en mettant en exergue itérativement les conflits d'opinions entre experts. Ces conflits sont débattus à chaque étape afin de lever le plus d'incertitudes possibles. Comme nous l'avons mentionné, Delphi a été appliquée avec succès lorsque les prévisions d'experts portent sur une grandeur scalaire (Linstone and Turoff, 1975). Delphi est basée sur le principe que les prévisions ou décisions prises par un groupe structuré de personnes sont plus précises que celles prises par des groupes non structurés (Rowe and Wright, 2001). Lorsqu'il s'agit de déterminer plusieurs paramètres ou d'atteindre plusieurs objectifs, les résultats sont moins concluants car les experts n'ont généralement d'expertise que de leur domaine et les interactions physiques ou préférentielles entre les paramètres ou les décisions viennent perturber l'établissement de tout consensus. Lorsque des décisions complexes sont contestées, il nous semble qu'une extension possible de la méthode Delphi consiste à associer des techniques multicritères à la méthode Delphi. Dans Delphi toute incohérence significative dans les jugements d'experts donne indifféremment lieu à une révision, en lui adjoignant une analyse multicritère, cette dernière peut orienter le choix des incertitudes à débattre : seuls les critères ayant un impact significatif sur la décision donnent alors lieu à des investigations poussées afin de résoudre les conflits.

Analytic Hierarchy Process (AHP (Saaty, 1980)) est justement présentée comme une méthode de conduite de processus décisionnel, une technique structurée pour aborder des décisions complexes, *i.e.* impliquant plusieurs facteurs décisionnels, lorsque des éléments importants de la décision sont difficiles à quantifier ou à comparer, ou lorsque la communication entre les membres d'une équipe est entravée par leurs différentes spécialités, terminologies, ou

perspectives. Nous résumons ci-après le processus en cinq étapes de cette démarche structurante :

1. Définition et décomposition hiérarchique du problème : cette étape concerne la modélisation de la situation ainsi que l'identification des experts qui pourraient être impliqués dans le processus de décision. La décomposition hiérarchique est principalement basée sur trois couches : un objectif principal est décomposé en critères, qui sont eux aussi ventilés en alternatives (qui doivent être évaluées en fonction de chaque critère) ;
2. Collecte des opinions des experts par l'utilisation de matrices de comparaison : les experts analysent la hiérarchie à travers des comparaisons par paires (échelles numériques de mesure). Les critères sont deux à deux comparés par rapport à l'objectif principal, alors que les alternatives sont comparées deux à deux par rapport à chaque critère. Ces comparaisons basées sur des processus mathématiques fournissent les priorités ;
3. Synthèse des jugements des experts : un mécanisme d'agrégation est utilisé pour extraire de la comparaison des matrices un résultat global sur la base des avis experts. L'opérateur d'agrégation est une moyenne pondérée ;
4. Vérification de la cohérence des jugements des experts : AHP permet l'identification des incohérences propres à chaque expert et l'incohérence globale entre les experts (basée sur l'analyse des matrices de comparaison). Cette étape peut utiliser les résultats obtenus à l'étape 3 dans le processus de décision ;
5. La décision finale repose sur le résultat du processus.

MACBETH est une autre méthode d'identification des préférences sous la forme d'un modèle d'agrégation de type WAM (Weighted Average Mean). Comme AHP, il s'agit d'une méthode dite indirecte (c'est la comparaison par paires qui permet d'accéder au modèle d'agrégation, *i.e.* qu'il n'est pas demandé au décideur de donner directement les paramètres du modèle d'agrégation). MACBETH permet au décideur de caractériser le potentiel de chaque action (Bana E Costa and Vansnick, 1997). MACBETH (Attractiveness by a Categorical Based Evaluation TecHnique) est basée sur la MAUT (Multi Attribute Utility Theory) (Dyer, 2004). Chaque action est évaluée selon un ensemble de critères selon des valeurs cardinales (des degrés de satisfaction). Ces évaluations sont agrégées grâce à une moyenne arithmétique pondérée dans la méthode initiale. L'utilisation du concept d'intensité diffère de AHP. Lorsqu'on introduit la notion d'intensité de préférence dans la comparaison par paire, l'intensité est rapportée à la différence de préférence ($valeur(x) - valeur(y) = k.\alpha$ où k caractérise l'intensité de préférence et α permet de respecter les bornes du domaine) et non pas au ratio comme dans AHP ($valeur(x) / valeur(y) = k.\alpha$). Les échelles associées aux critères ainsi construites sont alors des échelles d'intervalles. L'opérateur d'agrégation de type WAM utilisé dans MACBETH est signifiant pour une échelle d'intervalle. Par construction, MACBETH garantit que les degrés de satisfaction des critères et le degré agrégé obtenus correspondent à des échelles d'intervalle cohérentes (Bana E Costa and Vansnick, 1997).

L'approche d'aide à la décision considérée ici est assimilable au processus précédent de la méthode AHP avec les considérations spécifiques suivantes qui nous guideront par la suite à la fois dans le choix de la modélisation des incertitudes et des opérateurs d'agrégation :

- i. un expert émet un avis sur une alternative uniquement si le critère selon lequel il procède à l'évaluation relève de son domaine d'expertise ; tous les experts ne se prononcent donc pas sur tous les critères ;
- ii. d'après (i), les évaluations sont censées être toutes pertinentes. Par conséquent, même une opinion isolée ne saurait être négligée. C'est d'elle que peut venir un nouvel éclairage sur la décision, point de vue que les autres experts n'avaient su distinguer parce que trop formatés dans un même moule ;
- iii. la variété des opinions est donc une source d'information en elle-même (il existe peut-être plusieurs possibles) ; la conserver c'est garantir qu'aucun point de vue n'est oublié. Il est donc inenvisageable d'utiliser des processus d'agrégation de type majorité dans la fusion d'avis d'expert qui élimineraient systématiquement l'information originale ; le processus d'agrégation doit donc inclure l'incertitude liée à la disparité d'opinions et propager ces incertitudes via l'opérateur d'agrégation à la décision finale ;
- iv. En outre, les interactions entre les critères (les facteurs décisionnels qui interagissent dans la méthode Delphi) empêchent l'utilisation d'une simple moyenne pondérée comme opérateur d'agrégation comme proposé dans AHP ou MACBETH. Le modèle d'agrégation devra inclure une représentation de ces interactions.

En conclusion, l'utilisation coordonnée de méthodes de structuration du débat et d'analyse multicritère peut apparaître comme une solution intéressante pour tirer profit au mieux d'un débat d'experts. En effet, Delphi est une méthode de décision interactive qui repose sur un panel d'experts et organise le débat de sorte que les incertitudes soient levées itérativement. Néanmoins, sans l'introduction d'une analyse multicritère, toutes les incohérences survenues lors du débat peuvent apparaître comme des perturbations significatives pour la décision finale. Sans analyse multicritère, l'organisation du débat ne peut porter que sur l'intensité de l'incertitude sur un point donné : plus l'incertitude est forte, plus il est prioritaire qu'elle soit reproposée à l'évaluation des experts. Ce principe ne tient pas compte de ce que certaines dimensions de la décision peuvent s'avérer sans conséquences majeures sur la décision finale. L'introduction d'une méthode d'analyse multicritère dote l'organisation du débat d'un système de contrôle plus efficace : les incohérences dans les avis d'experts qui seront discutées en priorité seront celles qui se rapportent aux critères qui influent le plus sur la décision finale. Une analyse de sensibilité de l'opérateur d'agrégation fournira alors cette information et sera utilisée pour piloter le débat, ce qui constituera une aide pour la dimension collective de l'activité du décideur (coordination).

Les méthodes de fusion et d'agrégation qui sont introduites dans ce chapitre font suite aux travaux de Denguir-Rekik. La méthode de fusion qu'elle a utilisée dans (Denguir-Rekik, 2007) se base sur une approximation possibiliste des données d'entrée du processus d'évaluation. L'évaluation propre à un critère (ou la synthèse des avis) \mathcal{F}_i est associée à une distribution de possibilité. Le choix de la représentation possibiliste est lié à la nature des

données d'entrée du domaine d'application de (Denguir-Rekik, 2007), *i.e.*, le e-commerce : les évaluations sont imprécises, la diversité des avis les rend incertaines, et la rareté des opinions exprimées empêche tout modèle probabiliste. Ces évaluations élémentaires sont ensuite agrégées pour obtenir l'évaluation globale de l'alternative. L'agrégation consiste à propager l'incertitude sur les entrées à la distribution agrégée de sortie. Le modèle approché est basé sur les approximations possibilistes inférieure et supérieure des distributions de données fournies par les experts. (Denguir-Rekik, 2007) choisit finalement de modéliser les distributions d'entrée par une distribution unique, compromis affine des bornes inférieure et supérieure des distributions possibilistes envisageables pour représenter les données brutes : les distributions d'entrée sont alors nécessairement des trapèzes afin de faciliter les calculs. Il y a deux inconvénients majeurs à cette dernière approximation. Le premier est que la distribution trapézoïdale peut ne pas appartenir à l'encadrement modélisé par les approximations possibilistes inférieure et supérieure des distributions d'entrées (voir les détails plus loin). Le second est que cette approximation peut être à l'origine d'une perte d'information par rapport aux données initiales. Nous profitons de cette remarque pour revisiter complètement le processus de construction des distributions d'entrée possibilistes proposé par (Denguir-Rekik, 2007), et essentiellement basé sur le modèle contraignant de (Mauris et al., 2000) en le généralisant via la représentation de (Destercke, Dubois and Chojnacki, 2009).

Notre contribution, à ce niveau, réside donc dans la représentation de la distribution de chaque critère et chaque alternative par les deux approximations supérieure et inférieure (des fonctions affines par morceaux) des distributions des données d'entrée et dans leur traitement tout au long du processus. De plus, nous proposons un traitement plus précis du cas où des évaluations incohérentes—*i.e.*, donnant lieu à une représentation possibiliste multimodale—sont présentes dans les données en utilisant la méthode des sous-ensembles maximaux cohérents (SMC).

Sur le plan de l'agrégation des distributions de possibilité, notre méthode propose une démarche qui permet d'appliquer l'opérateur d'agrégation sur les approximations inférieure et supérieure de départ, ne supposant rien a priori quant aux formes des distributions d'entrée et permettant de définir l'indicateur qui modélise la dispersion des avis sur la décision finale. La gestion de l'incohérence des données est donc plus détaillée et approfondie que dans (Denguir-Rekik, 2007). Un classement des alternatives est proposé, basé sur les nombres flous calculés pour les distributions de possibilité globales des alternatives.

Enfin, (Denguir-Rekik, 2007) introduisait la notion de contribution d'un critère à la décision pour expliquer, justifier cette décision. Ici, nous nous intéressons spécifiquement à la contribution des critères à l'indicateur de dispersion des avis pour introduire un pilotage du débat qui vise à réduire l'entropie du débat aussi vite que possible.

En conclusion, la démarche méthodologique proposée ici pour répondre à la problématique de pilotage de débat d'experts par le décideur peut être résumée dans les points suivants répondant aux cinq questions que nous avons soulevées dans l'introduction de ce chapitre :

- représentation de l'imprécision des avis d'experts $x_i^{j,k} \in \mathbb{K}$;
- fusion \mathcal{F}_i des avis d'experts par une distribution de possibilité ;
- introduction d'un indicateur, noté Δ , pour quantifier la dispersion des avis sur un critère donné ;
- utilisation de l'intégrale de Choquet pour exprimer les préférences du décideur et calculer les évaluations globales des alternatives ;
- calcul de la contribution de chaque critère à la dispersion observée sur les évaluations globales et utilisation de cette contribution pour piloter le débat d'experts.

Ces cinq points sont présentés en détail dans le modèle proposé pour la fusion d'avis d'experts de la section 6 de cette thèse.

3. Rappels sur la logique floue

La logique floue est un cadre intéressant pour notre problématique et ce à différents niveaux. D'un côté, elle permet la représentation des connaissances imparfaites et de l'autre côté, elle est le cadre théorique d'un large panel de méthodes de fusion et d'agrégation utiles pour la solution proposée dans ce chapitre.

La logique floue a été introduite dans les travaux de Lotfi A. Zadeh en 1965 dans l'objectif de représenter les connaissances imprécises ou approximatives et par la suite a été utilisée pour manipuler les connaissances imparfaites en général (Zadeh, 1978) (Bouchon-Meunier, 1995).

La forme la plus générale d'imprécisions a été introduite par Zadeh (Zadeh, 1965) à travers la théorie des sous-ensembles flous (cf. section 3.1). Afin de parvenir à un raisonnement approximatif proche du raisonnement humain, Zadeh (Zadeh, 1978) a ensuite introduit la théorie des possibilités (cf. section 3.2). Elle a été développée ensuite par Dubois et Prade (Dubois and Prade, 1988a) qui ont proposé une généralisation nuancée. Kaufmann fut le premier à avoir introduit les sous-ensembles flous en France au début des années soixante-dix (Kaufmann, 1980).

Cette section rappelle, pour le lecteur non familier au domaine, les notions élémentaires issues de la théorie des sous-ensembles flous, de la théorie des possibilités et de la théorie de l'évidence qui seront nécessaires à la représentation d'avis d'experts dans notre problématique.

3.1 La théorie des sous-ensembles flous

Soit X l'espace d'évaluation d'un critère c .

La théorie des sous-ensembles flous (Zadeh, 1965) considère que les éléments d'un ensemble X peuvent posséder des propriétés communes, mais pas de façon absolue. Cette situation est

modélisée par une fonction appelée *fonction d'appartenance* qui attribue à chaque élément $x \in X$ une valeur qui quantifie le degré avec lequel il possède une propriété, appelé *degré d'appartenance*.

Définition 2.1 : un sous-ensemble flou A de X est défini (Zadeh, 1965) par une fonction d'appartenance ($\pi_A : X \rightarrow [0,1]$) qui associe à chaque élément $x \in X$ un degré $\pi_A(x) \in [0,1]$ avec lequel x appartient à A . L'ensemble flou est noté aussi π_A .

Les sous-ensembles flous de X représentent des connaissances imparfaites sur X . On peut considérer que les éléments $x \in X$ sont perçus de façon imprécise.

A partir de cette définition, des opérateurs sont définis sur les sous-ensembles flous de la manière suivante :

- A est *inclus* dans B si :

$$\forall x \in X : \pi_A(x) \leq \pi_B(x) \quad (2.1)$$

- L'*union* de deux sous-ensembles flous A et B de X est C telle que :

$$\forall x \in X : \pi_C(x) = \max(\pi_A(x), \pi_B(x)) \quad (2.2)$$

Les éléments de X qui possèdent une même propriété avec un degré au moins égal à un seuil $\alpha \in [0,1]$, peuvent être représentés par un sous-ensemble classique comme suit :

Définition 2.2 : pour un seuil donné $\alpha \in [0,1]$, on définit la α -*coupe* du sous-ensemble flou A de X (ou sous-ensemble de niveau α associé à A) comme le sous-ensemble $A_\alpha = \{x \in X / \pi_A(x) \geq \alpha\}$ de X .

Un des outils fondamentaux dans la théorie des sous-ensembles flous est *le principe d'extension* de Zadeh (Zadeh, 1995). Il a été introduit dans l'objectif d'exploiter les opérations classiques dans le cas de données floues.

Définition 2.3 : Soient X et Y deux ensembles, A un sous-ensemble flou de X et $\varphi : X \rightarrow Y$ une application qui associe à tout élément $x \in X$ un élément $y \in Y$. Le *principe d'extension* de Zadeh permet de définir un sous-ensemble flou B de Y associé à A par l'intermédiaire de φ :

$$\forall y \in Y : \pi_B(y) = \begin{cases} \sup_{\{x \in X / y = \varphi(x)\}} \pi_A(x) & \text{si } \varphi^{-1}(\{y\}) \neq \emptyset \\ 0 & \text{si } \varphi^{-1}(\{y\}) = \emptyset \end{cases} \quad (2.3)$$

3.2 La théorie des possibilités

La théorie des possibilités (Zadeh, 1978) (Dubois and Prade, 1988b) permet de tenir compte de l'imprécision des données ainsi que de l'incertitude à partir de deux mesures : la mesure de possibilité et la mesure de nécessité. Dans ce sens, elle propose un cadre alternatif à la théorie des probabilités.

3.2.1 Mesure et distribution de possibilité

Définition 2.4 : Une *mesure de possibilité*, noté Π est une application qui attribue à chaque événement défini sur X , c'est-à-dire tout élément de $P(X)$, un coefficient entre 0 et 1 évaluant à quel point cet événement est possible. Plus précisément, $\Pi : P(X) \rightarrow [0,1]$ est telle que:

- i) $\Pi(\emptyset) = 0$, $\Pi(X) = 1$;
- ii) $\forall A_1 \in P(X), A_2 \in P(X), \dots$

$$\Pi\left(\bigcup_{i=1,2,\dots} A_i\right) = \sup_{i=1,2,\dots} \Pi(A_i) \quad (2.4)$$

Remarque 2.1 :

- Pour deux ensembles A et B de X , ii) devient : $\Pi(A \cup B) = \max(\Pi(A), \Pi(B))$;
- Une mesure de possibilité n'est donc pas additive ;
- Pour l'intersection de deux ensembles A et B de X , $\Pi(A \cap B) \leq \min(\Pi(A), \Pi(B))$.

Une mesure de possibilité Π peut être caractérisée par une fonction $\pi : X \rightarrow [0,1]$, satisfaisant la condition de normalisation suivante : $\sup_{x \in X} \pi(x) = 1$. Cette fonction est appelée *distribution de possibilité*. De plus, une distribution de possibilité peut être construite à partir d'une mesure de possibilité et vice versa de la manière suivante :

Propriété 2.1 : une mesure de possibilité Π peut être définie à partir d'une distribution de possibilité π de la manière suivante :

$$\forall A \in P(X) : \Pi(A) = \sup_{x \in A} \pi(x) \quad (2.5)$$

Propriété 2.2 : une distribution de possibilité π peut être définie à partir de la mesure de possibilité Π , dans le cas où X est dénombrable, de la manière suivante :

$$\forall x \in X : \pi(x) = \Pi(\{x\}) \quad (2.6)$$

3.2.2 Mesure et distribution de nécessité

La mesure de nécessité est une mesure duale associée à la mesure de possibilité. Elle a été introduite dans la théorie des possibilités pour donner plus d'information sur un événement A relatif à X . En effet, l'inconvénient de la mesure de possibilité est qu'elle peut produire pour un événement A les deux résultats : $\Pi(A)=1$ et $\Pi(A^c)=1$, où A^c est le complémentaire de A dans X . Ce qui signifie qu'il peut y avoir une ignorance totale sur la réalisation de A avec cette seule information, d'où le besoin d'une information complémentaire sur la réalisation de A qui est apportée par la mesure de nécessité.

Définition 2.5 : Une *mesure de nécessité* N est définie sur $N : P(X) \rightarrow [0,1]$, de la manière suivante :

- i) $N(\emptyset) = 0$, $N(X) = 1$;
- ii) $\forall A_1 \in P(X), A_2 \in P(X), \dots$

$$N\left(\bigcap_{i=1,2,\dots} A_i\right) = \inf_{i=1,2,\dots} N(A_i) \quad (2.7)$$

3.2.3 Relations entre mesures de possibilité et de nécessité

Le couple $(N(A), \Pi(A))$ mesure la croyance en la réalisation d'un événement A relatif à X . Il joue le rôle de la probabilité de la réalisation de l'événement A lorsque celle-ci ne peut être calculée. La quantité $\Pi(A)$ mesure le degré avec lequel l'événement A est susceptible de se réaliser, alors que la quantité $N(A)$ indique le degré de certitude que l'on peut attribuer à cette réalisation. Ainsi, la réalisation de l'événement A est certaine ($N(A)=1$) si et seulement si celle de son complémentaire est impossible ($\Pi(A^c)=0$).

Propriété 2.3 : Si la mesure de possibilité Π est définie à partir d'une distribution de possibilité π , la mesure de nécessité N duale de Π peut être définie à partir de π comme suit :

$$\forall A \in P(X), N(A) = \inf_{x \notin A} (1 - \pi(x)) \quad (2.8)$$

Une mesure de possibilité Π est liée à la mesure duale de nécessité N par les propriétés de dualité suivantes :

- $\forall A \in P(X), N(A) = 1 - \Pi(A^c)$;
- $\Pi(A) \geq N(A)$;
- $\max(\Pi(A), 1 - N(A)) = 1$;
- $N(A) \neq 0 \Rightarrow \Pi(A) = 1$;

$$- \quad \Pi(A) \neq 1 \Rightarrow N(A) = 0.$$

3.2.4 Mesure floue

Définition 2.6 : Une *mesure floue* μ est une fonction d'ensemble $\mu: P(X) \rightarrow [0,1]$. La quantité $\mu(A)$ mesure le degré de réalisation de l'événement A , en se basant sur des connaissances plus ou moins subjectives selon les informations dont on dispose sur X (Sugeno, 1974), (Murofushi and Sugeno, 1991). La fonction μ satisfait : $\mu(\emptyset) = 0$, $\mu(X) = 1$ et $\forall A, B \subseteq X, A \supseteq B \Rightarrow \mu(A) \geq \mu(B)$.

3.2.5 Fonctions de croyances et de crédibilité

Un cadre général pour la théorie des probabilités et la théorie des possibilités est la théorie de l'évidence (ou des fonctions de croyance) (Dempster, 1967) ; (Shafer, 1976). Ce cadre permet d'introduire les fonctions de croyance et de plausibilité qui permettent de construire un encadrement contenant des distributions de possibilités représentant les données.

Définition 2.7 : Une *masse de croyance* notée \mathcal{M} , est une fonction de $P(X)$ dans $[0,1]$ telle que : $\sum_{A \in P(X)} \mathcal{M}(A) = 1$ et $\mathcal{M}(\emptyset) = 0$.

Définition 2.8 : Un *élément focal* est une partie E , ($X \supseteq E \neq \emptyset$) telle que $\mathcal{M}(E) > 0$. Soit \mathbb{F} l'ensemble des éléments focaux de X . Le couple $(\mathbb{F}, \mathcal{M})$ est appelé *corps d'évidence*.

L'élément focal correspond à un événement auquel les observateurs croient, ne serait ce qu'un peu.

Définition 2.9 : La *fonction de croyance* notée Bel , d'un ensemble A de X est définie par : $Bel(A) = \sum_{\{E \in \mathbb{F} / A \supseteq E\}} \mathcal{M}(E)$.

où $\{E \in \mathbb{F} / A \supseteq E\}$ est l'ensemble des témoignages en faveur de A .

Définition 2.10 : La *fonction de plausibilité* notée Pl , d'un ensemble A de X est définie par : $Pl(A) = \sum_{\{E \in \mathbb{F} / A \cap E \neq \emptyset\}} \mathcal{M}(E)$ où $\{E \in \mathbb{F} / A \cap E \neq \emptyset\}$ est l'ensemble des éléments focaux qui ont une relation avec A et le rendent possible.

Les éléments focaux peuvent représenter des observations imprécises sous forme d'intervalles. Dans une telle situation, la synthétisation des observations consiste à calculer la mesure de probabilité définie sur les événements de $P(X)$, notée Pr . La probabilité $Pr(A)$ pour $A \in P(X)$, est imprécise ce qui signifie qu'elle appartient à l'intervalle :

$$\Pr(A) \in [Bel(A), Pl(A)] \quad (2.9)$$

La section suivante montre comment calculer des distributions de possibilité qui approchent la probabilité $\Pr(A)$ dans l'encadrement de (2.9). Ainsi, les fonctions de croyance et de plausibilité permettent de considérer une distribution de possibilité comme définissant implicitement une classe de mesures de probabilité \wp telle que :

$$\wp = \{P \mid \forall A, N(A) \leq \Pr(A) \leq \Pi(A)\} \quad (2.10)$$

4. Fusion d'évaluations sous forme d'intervalles

Cette section s'intéresse à la littérature sur la construction d'une distribution de possibilité en tant que fusion des avis des experts sur l'évaluation d'un critère. Plus précisément, elle concerne la fusion des avis d'experts lorsque ceux-ci sont des évaluations imprécises (intervalles contenant la valeur recherchée).

La fusion des avis permet de tenir compte de l'information fournie par tous les experts et de son imperfection. Ainsi, Ha-Duong (Ha-Duong, 2008) préconise l'utilisation de la fusion d'opinions dans un processus de décision pour éviter le comportement décisionnel suivant : *« quand la décision implique plusieurs parties et que les experts scientifiques ne sont pas unanimes, le décideur a tendance à se focaliser sur les résultats qui défendent ses intérêts ou à se focaliser sur les cas les plus extrêmes dans le groupe, même s'ils sont une minorité non représentative de l'opinion des experts »*.

Nous supposons que la vraie valeur de l'évaluation existe et qu'elle est inconnue pour le décideur. Le décideur se base sur les points de vue de plusieurs experts pour trouver une estimation de cette valeur. L'avis d'un expert sur la valeur d'un critère peut être imprécis et exprimée sous la forme d'un intervalle. Cela peut être dû au fait qu'il ne sait pas exactement évaluer dans quelle mesure précise l'alternative étudiée satisfait le critère, ou en raison de la possible absence de compétences de l'expert à évaluer la valeur de ce critère. Cette idée de représenter les avis des experts sous forme d'intervalles a été introduite dans (Kaufmann, 1988) et (Kaufmann and Gil-Aluja, 1993) en utilisant la théorie d'experts dans les environnements incertains. Cette théorie permet de faire face au traitement d'opinions de plusieurs experts. Ce qui mène à une analyse plus efficace car l'information collectée montre divers détails sur les avis et sur la tendance générale de l'opinion du groupe (Merigó, 2011). Les avis des experts sont généralement nécessaires dans les situations où il n'y a pas suffisamment de preuves statistiques pour étayer les hypothèses de probabilités précises.

Dans le cas où les avis ne sont pas des intervalles, il existe plusieurs constructions de distributions de possibilité qui ont été proposées. Par exemple, (Dubois et al., 2001) propose une méthode issue du Modèle des Croyances Transférables (TBM) où les experts ne sont pas considérés égaux en termes de compétence et de fiabilité. L'évaluation se fait sous forme de degré de satisfaction d'un critère pour une alternative sur une échelle ordinale de degrés de

satisfaction. La méthode a été utilisée pour l'évaluation de la valeur d'un candidat pour un poste (Dubois et al., 2001) et à la sensibilité du climat (Ha-Duong, 2008). Pour les évaluations qualitatives, la théorie des possibilités qualitatives (QPT) offre un cadre de représentation pour les valeurs imprécises imprégnées d'incertitude qualitative (Dubois and Prade, 1998) où chaque évaluation est représentée par une distribution de possibilité restreignant les valeurs plus ou moins possibles de l'évaluation d'un critère pour un expert. Lorsqu'il n'y a pas de conflit majeur entre les évaluations à fusionner, une combinaison conjonctive peut être réalisée ; elle met en évidence les valeurs sur lesquelles les experts s'accordent. En revanche, lorsque l'on considère de forts conflits, il est conseillé d'utiliser une combinaison disjonctive. Une combinaison disjonctive signifie que l'avis d'un expert important ne sera pas oublié, même s'il est en conflit avec l'avis d'un autre expert important. Des conjonctions et des disjonctions pondérées ont été proposées (Dubois and Prade, 1994) et (Dubois et al., 2001) où les pondérations prennent en compte les opinions du décideur sur l'évaluation d'un expert pour un critère et les opinions du décideur sur les experts. Une méthode de fusion fondée sur les sous-ensembles maximaux cohérents (Destercke, Dubois and Chojnacki, 2009) a été proposée. C'est une méthode de compromis entre conjonction et disjonction qui prend en compte toutes les sources en essayant de gagner le maximum d'informativité, les sources (capteurs ou experts) fournissant chacune une distribution de possibilité en tant qu'évaluation.

Pour le cas où les avis *i.e.* les éléments focaux sont des intervalles, contenant l'évaluation d'un critère c , la construction d'une distribution de possibilité notée π dépend de la nature de ces éléments. Cette distribution de possibilité peut être considérée comme la fonction d'appartenance de l'ensemble flou des valeurs possibles du critère c . Ces valeurs sont supposées être mutuellement exclusives, puisque le critère ne prend qu'une seule valeur.

Les données fournies par les experts sont donc supposées former une famille d'intervalles (éléments focaux) $\{I_t \mid t = 1, m\}$ concernant la valeur du critère c . Quatre cas de ces éléments focaux sont distingués : les éléments focaux sont (a) des singletons, (b) emboîtés, (c) cohérents, (d) incohérents.

4.1 Les éléments focaux sont des singletons

Dans ce cas la construction d'un histogramme est possible et on a :

$$\forall A \subset X, Pl(A) = Bel(A) = Pr(A)$$

Mais en général, il est supposé que les avis qui viennent d'experts ne sont pas donnés sous forme de singletons (la construction d'un histogramme n'est donc pas possible et la théorie des probabilités inadaptée), mais sous forme d'intervalles associés à la probabilité d'occurrence $p(I_t)$ (proportion d'estimations égales à I_t).

4.2 Les éléments focaux sont emboîtés

Dans le cas où les éléments focaux sont emboîtés *i.e.*, $I_1 \subset I_2 \subset \dots \subset I_m$, la fonction de *croyance* Bel de la Définition 2.9 est une mesure de nécessité et la fonction de *plausibilité* Pl de la Définition 2.10 est une mesure de possibilité (Shafer, 1976). Une distribution de possibilité π approchant les données $(I_{t=1,m})$ peut être construite de la manière suivante (Dubois and Prade, 1987a) :

$$\forall \omega \in X, \pi(\omega) = Pl(\{\omega\}) = \sum_{\{E \in \mathbb{F} / \{\omega\} \cap E \neq \emptyset\}} \mathcal{M}(E) = \begin{cases} 0 & \text{si } \omega \notin I_m \\ \sum_{l \leq t \leq m} p(I_t), & \text{si } \omega \in (I_l - I_{l-1}) \\ 1 & \text{si } \omega \in I_1 \end{cases} \quad (2.11)$$

Les intervalles peuvent être attachés à des niveaux de confiance λ_t . Le niveau de confiance peut être interprété conventionnellement comme la borne inférieure sur la probabilité que la valeur du critère c appartienne à I_t . Dans (Dubois and Prade, 1988b) et (Dubois and Prade, 1992c) les auteurs considèrent $\lambda_t = N(I_t)$. La distribution de possibilité équivalente à la famille $\{(I_1, \lambda_1), (I_2, \lambda_2), \dots, (I_m, \lambda_m)\}$ est définie (Yager, 1992) comme la distribution π la moins spécifique qui obéit aux contraintes $\lambda_t = N(I_t)$ selon (2.8). La solution est unique (Dubois and Prade, 1987a) :

$$\forall \omega \in X, \pi(\omega) = \min_t \max(1 - \lambda_t, \chi_{I_t}(\omega)) = \begin{cases} 1 & \text{si } \omega \in I_1 \\ \min_{t: \omega \notin I_t} (1 - \lambda_t), & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.12)$$

où χ_{I_t} est la fonction d'appartenance classique de l'ensemble I_t ($\chi_{I_t}(\omega) = 1$ si $\omega \in I_t$, 0 sinon).

Cette méthode a été utilisée dans l'évaluation d'activités de processus industriels (Mauris et al., 2000) et de jugements d'experts (Sandri, Dubois and Kalfsbeek, 1995). Les experts sont censés être capables de fournir plusieurs intervalles emboîtés I_1, I_2, \dots, I_m directement, ainsi que les niveaux de confiance $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$, *i.e.*, du point de vue d'un expert, la meilleure borne inférieure du pourcentage de cas où la quantité x appartient à A_t . Dans (Sandri, Dubois and Kalfsbeek, 1995), en pratique seulement trois intervalles ont été retenus. Dans (Mauris et al., 2000), une méthode simple est proposée pour calculer un sous-ensemble flou (avec la fonction d'appartenance $\mu_{\{a,b,c,d\}}$) en le caractérisant seulement par son support $[a, d]$ et son noyau $[b, c]$. Le support est un intervalle pessimiste pour la valeur de x tandis que le noyau est l'intervalle le plus optimiste.

4.3 Les éléments focaux sont cohérents

Lorsque les données disponibles (intervalles) sont cohérentes mais pas emboîtés, il est alors possible de construire une distribution de possibilité à partir des intervalles $\{I_t \mid t=1, m\}$ (Dubois and Prade, 1987a). Ce principe initialement appliqué à la fusion de capteurs peut être transposé au cas où les résultats sont des avis d'experts qui donnent leurs estimations sous forme d'intervalles. Les auteurs supposent que l'information soit un minimum cohérente *i.e.*, $I = \bigcap_{t=1, m} I_t \neq \emptyset$. L'idée est de construire des mesures de possibilité et de nécessité qui

fournissent un encadrement des valeurs de probabilités que l'on aurait obtenues si les informations avaient été précises (Dubois and Prade, 1986a). Pour cela, des éléments focaux emboîtés E_l ($l=1, r$) sont introduits pour se placer dans le cas (b). Les E_l sont définis tels que : $I \subseteq E_1 \subseteq E_2 \dots \subseteq E_r = \bigcup_{t=1, m} I_t$ (chaque avis I_t est affecté de façon unique au plus petit E_l qui puisse le contenir). Leurs pondérations probabilistes $\mathcal{M}(E_l)$ sont définies par :

$$\forall l, \mathcal{M}(E_l) = \sum_{I_t \text{ affecté à } E_l} p(I_t) \text{ où } p(I_t) \text{ est la probabilité d'occurrence de l'intervalle } I_t.$$

Dans (Dubois and Prade, 1986a), une façon de construire les éléments E_l est proposée : le meilleur choix de l'ensemble des E_l est l'ensemble des α -coupes de l'ensemble flou π_{F_1} construit à partir des données $\{I_t \mid t=1, m\}$:

$$\forall \omega, \pi_{F_1}(\omega) = p(I_t) \cdot \sum_{t=1, m} \chi_{I_t}(\omega) \quad (2.13)$$

où χ_{I_t} est la fonction caractéristique classique de I_t .

La construction des ensembles E_l est la suivante (Dubois and Prade, 1986a) : à chaque α -coupe, un nouvel intervalle E_l est construit tel que $E_l = E_{l-1} \cup E_\alpha$ ($E_1 = I$) avec $E_\alpha = \{\omega \mid \pi_{F_1}(\omega) \geq \alpha\}$.

Soit Π_1 (resp., N_1) la mesure de possibilité (resp., nécessité) définie à partir de la distribution π_{F_1} comme dans la formule (2.5) (resp., (2.8)). Soit, maintenant, π_{F_2} la distribution de possibilité définie pour les éléments focaux emboîtés E_l ($l=1, r$) comme dans la formule (2.11) ($p(E_j) = \mathcal{M}(E_j)$) :

$$\forall \omega, \pi_{F_2}(\omega) = \begin{cases} 0 & \text{si } \omega \notin E_r \\ \sum_{l \leq j \leq r} \mathcal{M}(E_j), & \text{si } \omega \in (E_l - E_{l-1}) \\ 1 & \text{si } \omega \in E_1 \end{cases} \quad (2.14)$$

Soient Π_2 et N_2 les mesures de possibilité et de nécessité définies à partir de π_{F_2} . Les propriétés suivantes sont alors démontrées (Dubois and Prade, 1986a):

- i- $F_1 \subseteq F_2$ (F_2 est plus imprécis que F_1 , $F_1 = F_2$ si les intervalles I_t sont emboîtés)
- ii- $\forall A, [N_1(A), \Pi_1(A)] \subseteq [Bel(A), Pl(A)] \subseteq [N_2(A), \Pi_2(A)]$
avec $Pr(A) \in [Bel(A), Pl(A)]$

où les fonctions de croyance Bel (cf. Définition 2.9) et de plausibilité Pl (cf. Définition 2.10) sont définies pour les éléments focaux $\{I_t | t=1, m\}$. Dubois et Prade ont montré (Dubois and Prade, 1986a) que les sous-ensembles flous F_1 et F_2 sont respectivement le plus grand et le plus petit sous-ensemble flou (au sens de l'inclusion) tels que i) et ii) soient vérifiées et que les sous-ensembles flous F_1 et F_2 constituent les meilleures (au sens de l'inclusion) approximations (possibilistes) inférieure et supérieure de l'ensemble des données $\{I_t | t=1, m\}$.

Après avoir construit les approximations possibilistes inférieure π_{F_1} et supérieure π_{F_2} de l'ensemble des données $\{I_t | t=1, m\}$ qui sont à la base de l'encadrement des valeurs de la probabilité recherchée (ii), vient ensuite l'étape du choix d'une distribution approchée π , à partir de π_{F_1} et π_{F_2} , qui représente au mieux ces données. Il est souvent d'usage dans une application, quelle que soit l'ingénierie concernée, de raisonner sur une valeur fût-elle erronée plutôt que de conserver un encadrement de la grandeur. Dans (Denguir-Rekik, 2007), une approximation sous forme de trapézoïde $\pi = \mu_{\{a,b,c,d\}}$ est choisie pour représenter les données sur chaque mode. L'approximation est basée sur la règle suivante : le noyau de $\mu_{\{a,b,c,d\}}$ est celui de π_{F_2} et son support est celui de π_{F_1} .

L'approximation trapézoïdale proposée dans (Denguir-Rekik, 2007) qui a certes le mérite de faciliter les calculs ultérieurs (agrégation) est malheureusement la source d'une perte d'information. De plus, la distribution π peut ne pas appartenir à l'encadrement de la probabilité.

Les connaissances ne seront en général ni précises, ni complètement cohérentes. Probabilité d'une part, et possibilité-nécessité d'autre part, correspondent à deux situations extrêmes, donc idéales (Dubois and Prade, 1987a). Malheureusement, les experts peuvent avoir des avis contradictoires. Ce qui signifie que la condition de cohérence ne tient pas toujours, *i.e.*, que l'on peut avoir $\bigcap_{t=1,m} I_t = \emptyset$. La section suivante traite de ce cas.

4.4 Les éléments focaux sont incohérents

La divergence entre les points de vue des experts peut conduire à des intervalles qui ont une intersection vide, *i.e.*, $\bigcap_{t=1,m} I_t \neq \emptyset$ ne tient plus.

Définition 2.11 : Soit π une distribution de possibilité représentant les données $\{I_t \mid t=1,m\}$. Si $\bigcap_{t=1,m} I_t \neq \emptyset$, π est appelée une distribution monomodale. Sinon ($\bigcap_{t=1,m} I_t = \emptyset$), π est appelée une distribution multimodale et le nombre de modes de π correspond au nombre de groupes disjoints d'intervalles d'intersection non vide.

Dans (Denguir-Rekik, 2007), il est suggéré de considérer les groupes disjoints d'intervalles d'intersection non vide sans donner de méthode pour calculer ces groupes. L'auteur propose de traiter chaque groupe séparément (comme dans le cas de la cohérence des données) puis de faire l'union des distributions de possibilités ainsi obtenues. Cette approche aboutit à des distributions multimodales pour lesquelles chaque mode est normalisé. Dans (Dubois, Hajek and Prade, 2000), un algorithme linéaire qui calcule les groupes disjoints d'intervalles d'intersection non vide a été proposé. Chaque groupe d'intervalles est appelé un SMC : sous-ensemble maximum cohérent. Cette notion a été introduite dans (Rescher and Manor, 1970) comme moyen de raisonnement dans le cas de bases logiques inconsistantes et a été étendue aux cas des représentations probabilistes imprécises dans (Walley, 1982) et (Destercke, Dubois and Chojnacki, 2009).

4.5 Indicateurs de description d'une distribution de possibilité

Dans cette section, nous nous intéressons à la définition d'indicateurs qui permettent de décrire une distribution de possibilité π représentant les données $I_t \mid t=1,m$.

Plusieurs indicateurs ont été proposés dans (Denguir-Rekik, 2007) pour décrire une distribution de possibilité. Ils se basent sur les quantités représentant les « espérances » mathématiques $E^*(\pi) = \int r.dN(\{x / \pi(x) \leq r\})$ et $E_*(\pi) = \int r.d\Pi(\{x / \pi(x) \leq r\})$ d'une distribution de possibilité (Dubois and Prade, 1987a), *i.e.* les valeurs moyennes inférieure et supérieure des distributions de possibilité associées aux mesures de probabilité définies par la famille \wp dans la formule (2.10). Parmi ces indicateurs : l'indicateur de position et l'indicateur d'imprécision moyenne (« moments d'ordre un et deux »).

L'*indicateur de position MD* est une estimation de la valeur « moyenne » précise du degré de satisfaction associé à la distribution de possibilité π , il est le milieu de l'intervalle moyen $[E_*(\pi); E^*(\pi)]$ de la distribution π :

$$MD(\pi) = (E_*(\pi) + E^*(\pi)) / 2 \quad (2.15)$$

Dans le cas multimodal (distribution ayant plusieurs modes), (Denguir-Rekik, 2007) propose de considérer l'indicateur de position comme un vecteur où chaque composante représente l'indicateur de position de la distribution monomodale associée. Ce moment d'ordre 1 peut aussi être représenté comme la moyenne ou la médiane des indicateurs de position des distributions monomodales.

L'indicateur d'imprécision moyenne Δ est une valeur précise qui quantifie l'imprécision moyenne des évaluations représentées par la distribution π . Dans le cas monomodal, il s'agit de la largeur de l'intervalle moyen de la distribution de possibilité π :

$$\Delta(\pi) = E^*(\pi) - E_*(\pi) \quad (2.16)$$

Dans le cas multimodal, l'écriture de la distribution comme l'union de distributions monomodales ($\pi = \bigcup_{\beta=1}^q \pi^\beta$, q est le nombre de modes) a permis l'écriture suivante (Denguir-Rekik, Mauris and Montmain, 2006) ; (Denguir-Rekik, Mauris and Montmain, 2009) :

$$\Delta(\pi) = \sum_{\beta=1}^q \Delta(\pi^\beta) \quad (2.17)$$

D'autres indicateurs ont été proposés (Denguir-Rekik, 2007) comme l'indicateur de divergence ou encore l'indicateur d'asymétrie. Mais, compte tenu de notre domaine d'application, seuls les indicateurs de position et d'imprécision moyenne ont été retenus : le premier est un « score moyen » précis que l'on souhaite associer aux alternatives, le second mesure les divergences de point de vue des experts et sera utilisé pour piloter le débat d'experts.

5. Agrégation des distributions de possibilité

Dans cette section, il s'agit de calculer une distribution globale π_{ag} qui synthétise n distributions de possibilité π_i . Ce calcul repose sur le choix de l'opérateur d'agrégation \mathcal{G} qui permet de synthétiser les distributions de possibilité π_i .

Nous désignons par $\mathcal{P}(X)$ l'ensemble des distributions de possibilité de X dans $[0,1]$. Supposons que $\forall i=1,n, \pi_i \in \mathcal{P}(X)$: si les distributions représentent les évaluations de n critères, cela revient à dire que les critères sont évalués sur le même espace X (cela évite les problèmes de commensurabilité). Ainsi \mathcal{G} peut être défini de $\mathcal{P}(X)^n$ dans $\mathcal{P}(X)$ de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \mathcal{G} : \mathcal{P}(X)^n &\rightarrow \mathcal{P}(X) \\ (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) &\rightarrow \pi_{ag} = \mathcal{G}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) \end{aligned} \quad (2.18)$$

L'identification de l'opérateur d'agrégation \mathcal{G} revient à définir une stratégie décisionnelle sur la sélection des alternatives en concurrence dans le processus de décision. \mathcal{G} fournit une représentation analytique du système de préférences du décideur. Un des aspects significatifs dans les problèmes d'agrégation est la prise en compte de l'importance des critères considérés, laquelle est habituellement modélisée par l'utilisation de poids, et jusqu'à récemment, les fonctions les plus utilisées étaient les moyennes pondérées. Cependant, ces fonctions présentent certaines limites, puisqu'une somme pondérée ne saurait rendre compte des interactions préférentielles qui peuvent exister entre critères. En effet, il est bien connu en théorie de l'utilité multi-attribut (MAUT) que ces fonctions conduisent à l'indépendance préférentielle mutuelle (Keeney and Raiffa, 1976) parmi les critères, qui exprime, dans un certain sens l'indépendance des critères. Comme ces fonctions ne sont pas appropriées en présence de critères interdépendants, la tendance a été de construire des critères censés être indépendants, ce qui entraînait souvent des erreurs dans les évaluations (Akharraz, 2004).

Les opérateurs d'agrégation de la famille de l'intégrale de Choquet (Grabisch, 1996) sont une solution intéressante pour l'agrégation car ils proposent un compromis entre plusieurs autres opérateurs classiques. La prise en compte des interactions par l'intégrale de Choquet est modélisée par une mesure floue μ définie sur l'ensemble C des critères, qui remplace la classique distribution de poids dans le cas de la moyenne pondérée. Le coefficient $\mu(B)$, pour $B \subseteq C$, est interprété comme le poids ou l'importance de la coalition des critères de B . Cette mesure permet de prendre en considération une représentation flexible des phénomènes complexes d'interaction entre les critères en donnant des poids pour toutes les combinaisons de critères. La monotonie d'une mesure floue (Définition 2.6) implique qu'ajouter un critère à une combinaison ne peut faire décroître l'importance de celle-ci.

Les intégrales floues sont des intégrales d'une fonction par rapport à une mesure non-additive, et donc permettant d'intégrer les évaluations introduites ci-dessus. Parmi celles-ci, outre les propriétés usuelles des opérateurs d'agrégation, et la modélisation de l'importance relative des critères, la famille de l'intégrale de Choquet permet la représentation de phénomènes d'interaction mutuelle qui peuvent exister entre certains critères. Ces interactions s'étendent de la synergie positive (interaction positive) à la redondance négative (interaction négative). La littérature sur les mesures et intégrales floues, ainsi que sur leurs applications, est conséquente, voir par exemple (Sugeno, 1977) ; (Grabisch, Nguyen and Walker, 1995), (Grabisch, 1996) ; (Grabisch, Orłowski and Yager, 1998) ; (Grabisch et al., 2000) ; (Marichal, 1998) ; (Murofushi and Sugeno, 1991) ; (Jimenez-Losada et al., 2010) ; (Grabisch and Labreuche, 2005a) ; (Grabisch and Labreuche, 2004).

Dans un premier temps, nous présentons succinctement l'intégrale floue de Choquet de n scores précis $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in [0, 1]^n$. Dans un second temps, une extension sur les distributions de possibilité est fournie.

5.1 Intégrale floue sur des scores précis

Définition 2.12 : Soit μ une mesure floue sur $C = \{c_1, \dots, c_n\}$ (ensemble de n critères dont les évaluations sont respectivement $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in [0, 1]^n$). L'expression de l'intégrale de Choquet (Choquet Integral : $\mathcal{G} = CI_\mu$) discrète pour un vecteur (x_1, x_2, \dots, x_n) est :

$$CI_\mu(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n (x_{\sigma(i)} - x_{\sigma(i-1)}) \cdot \mu(A_{\sigma(i)}) \quad (2.19)$$

avec $\sigma(i)$ indiquant que les indices sont permutés de sorte que $0 = x_{\sigma(0)} \leq x_{\sigma(1)} \leq \dots \leq x_{\sigma(n)}$ et $A_{\sigma(i)} = \{c_{\sigma(i)}, \dots, c_{\sigma(n)}\}$.

L'intégrale de Choquet est une fonction idempotente, continue et monotone croissante, c'est un opérateur de compromis, stable pour les transformations linéaires positives. Les opérateurs connus : min, max, médiane, moyennes pondérées, moyennes pondérées ordonnées (OWA), vetos (Yager, 1988) sont des cas particuliers des intégrales de Choquet (Grabisch, 1997a). L'intérêt de l'intégrale de Choquet se situe dans le fait qu'elle peut modéliser l'importance relative des critères et les interactions mutuelles entre eux.

L'importance est modélisée par l'indice de Shapley (Shapley, 1953) qui est interprété, en aide à la décision multicritère, comme la valeur moyenne (pondérée) des contributions marginales du critère c_i dans toutes les coalitions auxquelles il participe. Le deuxième type de paramètres auquel fait appel l'intégrale de Choquet correspond aux interactions entre les critères. Une définition de ces paramètres a été proposée par Murofushi et Soneda (Murofushi and Soneda, 1993) puis généralisée à n'importe quelle coalition de critères (Grabisch, 1997b).

La principale limite des modèles d'agrégation basés sur des intégrales floues vient de leur propre richesse : le nombre de paramètres nécessaires à l'identification de l'intégrale peut apparaître comme rédhibitoire voire irréaliste dans de nombreuses applications. Pour régler ce problème d'identification des paramètres de l'intégrale et leur interprétation dans le processus d'agrégation, le concept de mesure k -additive a été proposé (Grabisch, 1997a), (Grabisch, 1997b). Celui-ci exprime l'idée que les indices d'interaction sont nuls pour tous les sous-ensembles de plus de k éléments. La mesure 2-additive est alors un modèle simple, ne considérant que les interactions des critères deux à deux, l'identification ne concerne plus que $n(n+1)/2$ coefficients au lieu des $2^n - 2$ requis pour une mesure floue quelconque. Cette mesure constitue un compromis intéressant entre le nombre de comportements décisionnels qu'elle peut modéliser et la difficulté de la tâche d'identification qu'elle requiert. Il existe de nombreuses méthodes permettant de procéder à cette identification paramétrique : (Bana E Costa and Changas, 2004) (Bana E Costa and Vansnick, 1997) (Grabisch, Labreuche and Vansnick, 2003).

En ce qui concerne l'interprétabilité, la représentation de l'intégrale de Choquet 2-additive en fonction des indices de Shapley et des interactions entre les critères peut prendre la forme suivante (Grabisch, 1996) :

Propriété 2.4 : Soit μ une mesure 2-additive sur $C = \{c_1, \dots, c_n\}$. L'expression de l'intégrale de Choquet associée à $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in [0, 1]^n$ est :

$$CI_\mu(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n v_i x_i - \frac{1}{2} \sum_{i>j} I_{ij} |x_i - x_j| \quad (2.20)$$

avec $v_i - \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} |I_{ij}| \geq 0$ pour $i=1, \dots, n$ et $\sum_{i=1}^n v_i = 1$ où les paramètres v_i sont les indices de Shapley et les paramètres I_{ij} sont les coefficients d'interactions.

Une description du comportement de l'intégrale de Choquet 2-additive en fonction des interactions est donnée de la façon suivante (Akharraz, 2004) :

- I_{ij} positive implique un comportement conjonctif entre les critères c_i et c_j , c'est-à-dire que la satisfaction simultanée des critères c_i et c_j est significative dans l'évaluation globale. Il s'agit d'une synergie positive entre les deux critères ;
- I_{ij} négative implique un comportement disjonctif entre les critères c_i et c_j , c'est-à-dire que la satisfaction de l'un des critères c_i ou c_j est suffisante pour avoir un effet significatif dans l'évaluation globale. Il s'agit d'une redondance négative entre les deux critères ;
- I_{ij} nul : les deux critères sont indépendants et les valeurs de Shapley agissent en tant que vecteur de poids dans une moyenne pondérée arithmétique, ceci constitue la partie linéaire de l'intégrale de Choquet.

Il est démontré dans (Akharraz, Mauris and Montmain, 2002) que l'opérateur CI_μ a une forme linéaire sur les simplexes définis par l'ordre des évaluations (un simplexe correspond à une permutation des indices). Ainsi, en considérant une permutation sur les scores des critères tels que $x_{\sigma(1)} \leq \dots \leq x_{\sigma(i)} \leq \dots \leq x_{\sigma(n)}$, CI_μ peut être écrit sous la forme suivante :

$$CI_\mu(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \Delta\mu_{\sigma(i)} x_{\sigma(i)} \quad (2.21)$$

où $\Delta\mu_{\sigma(n+1)} = 0$ et $\Delta\mu_{\sigma(i)} = \mu_{\sigma(i)} - \mu_{\sigma(i+1)}$ avec $\Delta\mu_{\sigma(i)} = v_{\sigma(i)} + \frac{1}{2} \sum_{i>j} I_{\sigma(i)\sigma(j)} - \frac{1}{2} \sum_{i<j} I_{\sigma(i)\sigma(j)}$

sachant que : $v_i - \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} |I_{ij}| \geq 0$.

5.2 Intégrale floue sur des scores imprécis

Nous allons nous concentrer ici plus spécifiquement sur la construction de la distribution de possibilité π_{ag} représentant le score agrégé des n distributions de possibilité π_i qui modélisent les évaluations imprécises des critères au moyen d'une intégrale de Choquet. Plusieurs méthodes ont été utilisées dans ce sens, parmi lesquelles l'extension de Zadeh (2.3) pour ($f = CI_\mu$) qui est générale mais peu pratique ; (Dubois and Prade, 1987b) proposent, par le biais du théorème de l'union, une méthode plus adaptée. Dans (Grabisch and Roubens, 1996), une méthode basée sur la transformée de Möbius de l'intégrale de Choquet, a été proposée, elle repose sur la détermination du minimum des distributions. Toujours en utilisant la transformée de Möbius, (Meyer and Roubens, 2006) montrent comment l'intégrale de Choquet peut prendre la forme d'une somme pondérée de minimums de nombres flous. La linéarité de l'intégrale de Choquet par région, qui conserve un même ordre des scores flous, peut aussi être exploitée (Denguir-Rekik, 2007), (Grabisch, Nguyen and Walker, 1995) et (Dubois and Prade, 1987b) : chaque fois qu'il y a une intersection des parties ascendantes (resp. descendantes) de deux distributions distinctes, il y a changement d'ordre. Entre ces points, les distributions des critères sont rangées dans un ordre donné (Dubois and Prade, 1988b). Pour des distributions linéaires par morceaux, il suffit alors de calculer l'intégrale aux niveaux des points d'intersection des distributions d'entrée pour obtenir la distribution agrégée (Grabisch, Nguyen and Walker, 1995). La distribution agrégée est alors elle aussi linéaire par morceaux.

Une écriture est proposée dans (Denguir-Rekik, 2007) en fonction des points d'intersection notés $l=1, \dots, p$, des parties ascendantes (respectivement descendantes) des distributions : chaque point d'intersection entre deux distribution π_i et π_j détermine deux domaines où l'intégrale de Choquet est linéaire puisque l'ordre des distributions est fixé dans un domaine. Ainsi, nous avons l'écriture suivante :

$$\pi_{ag} = \bigcup_{l=1..p+1} \pi^l = \bigcup_{l=1..p+1} \sum_{i=1..n} \Delta \mu_i^l \pi_i^l \quad (2.22)$$

p est le nombre de points d'intersections, les π^l (resp. π_i^l) sont les distributions de possibilité partielles de la distribution agrégée π_{ag} (resp. de la distribution de possibilité $\pi_i = \bigcup_{l=1..p+1} \pi_i^l$) (elles sont non nécessairement normalisées) définies entre les points séparant deux domaines l et $l+1$, $\Delta \mu_i^l$ est le poids relatif du critère c_i dans le domaine l .

(Denguir-Rekik, 2007) propose aussi une écriture analogue à celle de la formule (2.22) pour l'indicateur de l'imprécision moyenne de la distribution π_{ag} en fonction des indicateurs d'imprécision moyen des distributions partielles définies sur chaque domaine :

Théorème 2.1 : soit une distribution linéaire par morceaux π . Cette distribution peut être écrite comme $\pi = \bigcup_{l=1..p+1} \pi^l$ où les π^l sont les distributions linéaires adjacentes (pas nécessairement normalisées) et où p est le nombre de changements de linéarité. Nous avons alors :

$$\Delta(\pi) = \sum_{l=1..p+1} \Delta(\pi^l) \quad (2.23)$$

6. Le modèle proposé pour la fusion d'avis d'experts

Ce chapitre propose un modèle pour répondre au besoin d'un décideur qui souhaite piloter le débat dans le groupe d'experts qu'il convoque. Le modèle basé sur le principe de la méthode Delphi associée à un modèle relevant de la théorie de l'utilité multi-attributs MAUT, tente de focaliser les discussions des experts sur les critères majeurs de la décision du point de vue du décideur et pour lesquels des points de divergence sont apparus.

Le décideur (le stratège) que les experts $E^{j=1..r}$ conseillent donne la stratégie de choix, modélisée par l'opérateur d'agrégation \mathcal{G} , dans l'évaluation des alternatives $Al^{k=1..l}$ parmi lesquelles le décideur choisira la solution à son problème. Chaque alternative est distinguée par le degré de satisfaction relativement aux critères de la décision $c_{i=1..n}$. Les experts évaluent chaque alternative Al^k par rapport aux n critères. L'ensemble $\mathbb{K} := \{x_i^{j,k} / 1 \leq k \leq l, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq r\}$ représente ces évaluations ou avis.

Le modèle proposé ici tente d'apporter des réponses aux cinq questions que nous avons soulevées dans l'introduction que nous rappelons ici en y associant les réponses apportées :

- La représentation de l'incertitude qui entache les avis des experts : nous proposons une représentation qui tient compte de l'imprécision des avis des experts, les avis $x_i^{j,k}$ se présentent sous forme d'intervalles ;
- La synthétisation des avis de tous les experts sur un point de discussion donné : la méthode de fusion proposée permet de maximiser l'information conservée sur la diversité des avis ;
- La recherche d'un indicateur permettant de représenter la dispersion entre les avis sur ce point de discussion : les distributions construites sont analysées en fonction d'indicateurs appropriés (imprécision moyenne) ;
- La synthétisation de l'information concernant chaque option possible de décision en fonction des préférences du décideur : l'opérateur d'agrégation synthétise le système de préférences du décideur ;
- L'organisation du débat d'experts pour lever les incertitudes sur les critères les plus discriminants : l'agrégation proposée permet au travers de l'indicateur de dispersion

de détecter les critères qui contribuent le plus à la dispersion de l'évaluation globale d'une alternative. Cette information est utilisée pour contrôler le débat d'expert.

Ce sont donc bien sûr des erreurs de la dimension cognitive que nous nous proposons de réduire, mais le système de pilotage de la délibération d'experts permettra également de réduire les erreurs de la dimension collective en proposant une aide à la coordination, l'orchestration.

Nous détaillons toutes ces réponses dans la suite de cette section.

6.1 La représentation des avis

Dans cette section, nous nous intéressons à la représentation des avis fournis par les experts au décideur. Si tous les avis $x_i^{j,k}$ sont des scores quantitatifs précis, la théorie des probabilités est efficace dans ce cas et permet de construire une distribution de probabilité qui représente ces informations. Mais ce n'est malheureusement pas le cas en général. Par exemple, dans le cas de la problématique de la mise en place de barrière de sécurité industrielle, l'information brute interprétée en avis $x_i^{j,k}$ peut correspondre à des connaissances de type : « La barrière B peut ramener le nombre d'accidents entre 5 et 10 accidents ». Dans ce cas, les avis $x_i^{j,k}$ sont des évaluations imprécises sous forme d'intervalle contenant la vraie valeur recherchée.

L'étape d'agrégation (le choix de l'opérateur \mathcal{G}) impose que toutes les grandeurs manipulées soient commensurables. Pour cette raison, nous avons choisi d'évaluer tous les critères sur le même espace $X = [0, 20]$ et ils ont tous la sémantique d'un degré de satisfaction. Toute évaluation, *i.e.*, avis $x_i^{j,k}$, est un sous-intervalle de $[0, 20]$ et correspond à un score qui exprime l'avis de l'expert E^j par rapport à la satisfaction du critère c_i si l'alternative Al^k a été retenue.

6.2 La fusion des avis

Cette section est consacrée au choix de la méthode de fusion des avis des experts pour l'évaluation d'une alternative Al^k par rapport à un critère c_i . Cette fusion traduira une synthèse de la satisfaction du critère c_i si l'alternative Al^k a été retenue. Comme nous avons choisi de représenter les avis sous forme d'intervalles, une méthode de fusion intéressante consiste à fusionner les avis selon leur nature comme proposé dans la section 4. Mais comme, nous pensons que la divergence entre les points de vue des experts est fortement présente dans les applications visées par notre modèle, le traitement détaillé du cas où les éléments focaux sont incohérents devient nécessaire.

Pour ce faire, il faut calculer les groupes d'intervalles d'intersection non vide à partir des avis $I_t | t=1, m$. Cela revient à trouver des sous-ensembles $K_\beta \subset \{1, \dots, m\}$ tel que $\bigcap_{t \in K_\beta} I_t \neq \emptyset$. les sous-ensembles $K_\beta | \beta=1, q$ ($q > 1$) représentent les groupes d'intervalles d'intersection non vide calculés à partir des intervalles $I_t | t=1, m$ (voir section 4.4). Pour chaque groupe K_β , deux sous-ensembles flous $\pi_{F_1}^\beta$ et $\pi_{F_2}^\beta$ sont construits (voir la section 4.3.) comme approximations (possibilistes) inférieure et supérieure de l'ensemble des données $I_t | t \in K_\beta$.

Soit le sous-ensemble flou π_{F_1} (resp. π_{F_2}), l'union des sous-ensembles flous $\pi_{F_1}^\beta | \beta=1, q$ (resp. $\pi_{F_2}^\beta | \beta=1, q$) (cf. (2.2)) : $\pi_{F_1} = \max_{\beta=1, q} \pi_{F_1}^\beta$ (resp. $\pi_{F_2} = \max_{\beta=1, q} \pi_{F_2}^\beta$).

Comme la distribution de possibilité qui correspond aux données $I_t | t=1, m$ est l'union des distributions de possibilité correspondant aux données $I_t | t \in K_\beta$, il est clair que les deux distributions π_{F_1} et π_{F_2} sont des approximations possibilistes (elles sont normalisées car les distributions associées à $\pi_{F_1}^\beta$ et $\pi_{F_2}^\beta$ le sont et l'opérateur max conserve cette normalisation) inférieure et supérieure de l'ensemble des données $I_t | t=1, m$.

Les distributions π_{F_1} et π_{F_2} sont appelées des distributions q -modales.

Si nécessaire, pour ne garder qu'une seule distribution, une approximation affine par morceaux de type moyenne $\pi = \pi_M$ peut être envisagée pour le choix de la distribution approximative, basée sur les distributions π_{F_1} et π_{F_2} , qui représente au mieux ces données :

$$\pi_M = (\pi_{F_1} + \pi_{F_2}) / 2.$$

Dans notre approche, l'évaluation d'un critère, recueil des avis d'experts sous la forme de données $I_t | t=1, m$, est représentée par les approximations inférieure et supérieure tout au long du processus de fusion. L'approximation ne sera effectuée que lorsqu'il s'agira de faire chuter l'entropie, *i.e.*, prendre la décision : l'approximation portera sur la description a posteriori des distributions par des indicateurs de décision parce que nécessaire en pratique à l'interprétation du décideur.

En conclusion, les données $I_t | t=1, m$ seront alors représentées par les deux approximations possibilistes inférieure π_{F_1} et supérieure π_{F_2} qui les encadrent.

6.3 Choix des indicateurs

Cette section se focalise sur le choix des indicateurs appropriés pour notre modèle.

Nous avons choisi de calculer l'indicateur de position présenté (cf. formule (2.15) de section 4.5) et l'indicateur d'imprécision moyenne (cf. formules (2.16) et (2.17) de section 4.5) pour analyser les distributions de possibilité. En effet, l'indicateur de position permet une comparaison facile des alternatives pour le décideur et l'indicateur d'imprécision moyenne permet de connaître l'imprécision moyenne qui entache les évaluations expertes et d'identifier le critère qui contribue le plus à l'imprécision globale de la distribution agrégée d'une alternative. Ainsi, le décideur peut utiliser cette imprécision moyenne pour identifier quels sont les critères qui contribuent le plus à l'incertitude de la décision et se retourner alors vers les experts et leur demander d'accorder leurs jugements selon ce critère dans la mesure du possible.

Les indicateurs choisis ont pour objectif de simplement synthétiser la distribution pour le décideur. Cette approximation a posteriori est essentielle à la compréhension des résultats pour le décideur ce qui favorise l'interaction entre l'homme et son SIADG. Elle pourra être utilisée pour la comparaison de distributions ou pour la recommandation. Analyser une distribution par le biais de ses indicateurs est une réduction de l'information originelle. Cependant cette approximation est moindre, puisqu'il s'agit de calculer la distribution agrégée, puis d'en calculer les indicateurs a posteriori et de les expliquer par les variations élémentaires des indicateurs élémentaires correspondants. Ce qui diffère significativement de calculer les indicateurs de la distribution agrégée par agrégation des indicateurs élémentaires : l'information portée par les distributions initiales serait dans ce cas définitivement perdue puisque ramenées à des indicateurs de synthèse a priori, il n'est plus possible de revenir en arrière pour tirer le meilleur parti de l'information brute initiale. Alors que dans notre approche, les calculs sont fait a posteriori sur la distribution agrégée, si le décideur souhaite définir d'autres indicateurs plus originaux sur les distributions, il est toujours à même de le faire puisque les distributions contiennent quasiment toute l'information des données initiales.

6.4 L'agrégation des avis fusionnés

Dans cette section, il s'agit de calculer la distribution globale qui synthétise les distributions de possibilité construites pour chaque critère pour une alternative donnée. Chaque critère est représenté par sa distribution de possibilité construite par l'une des méthodes de fusion exposées précédemment. Ce traitement permet de comparer les alternatives en utilisant leurs distributions de possibilité : l'évaluation d'une alternative reste imprécise, tout se passe comme s'il s'agissait de propager l'incertitude sur les données d'entrées via l'opérateur d'agrégation.

Si la fusion d'avis d'experts (section 4) essaie de représenter au mieux l'évaluation des experts sans perte d'information (en incluant toutes les valeurs possibles des évaluations

parfois en conflit), l'agrégation a pour but de synthétiser l'attitude ou les exigences du décideur face à la satisfaction des critères. Les deux opérations ne conduisent généralement pas au même résultat et on ne peut pas les commuter. Pour nos besoins, les experts n'évaluent une alternative que selon les critères qui les concernent. Un expert n'est donc pas supposé être capable d'évaluer seul et globalement une alternative.

L'intérêt de l'agrégation est de fournir au décideur un classement des alternatives de la meilleure à la moins bonne, en tenant compte de tous les jugements, de tous les critères et de leur importance relative. Cette étape repose sur le choix de l'opérateur d'agrégation \mathcal{G} qui permet de synthétiser les distributions de possibilité π_i^k des critères construites pour cette alternative.

Pour chaque alternative Al^k et chaque critère c_i , une distribution de possibilité, noté π_i^k , est construite à partir de la fusion des avis $x_i^{j,k}$ (intervalles) des experts $E^{j=1,r}$ sur ce critère (étape de fusion \mathcal{F}_i). Ensuite, les π_i^k sont agrégés afin qu'à chaque alternative soit associée une évaluation unique sous forme de distribution de possibilité noté π^k , synthèse des évaluations partielles des critères (étape d'agrégation : opérateur \mathcal{G}) : $\pi^k = \mathcal{G}(\pi_1^k, \pi_2^k, \dots, \pi_n^k)$.

Les opérateurs d'agrégation de la famille de l'intégrale de Choquet sont intéressants pour notre modèle car ils proposent un compromis entre plusieurs autres opérateurs classiques. En plus, ils peuvent être écrits sous la forme d'une moyenne pondérée conventionnelle modifiée par les effets provenant des interactions entre les critères. Nous avons donc retenu une intégrale de Choquet comme opérateur d'agrégation.

Quelle que soit la méthode implémentée pour fusionner les avis d'experts sur un critère, nous avons, en sortie de la fusion, des distributions affines par morceaux quelle que soit la méthode de construction de ces distributions. Nous cherchons à identifier quels critères ont le plus contribué à l'imprécision moyenne de l'évaluation d'une alternative pour utiliser cette information à des fins de contrôle du débat d'experts : contrairement à la méthode Delphi, nous souhaitons que soient débattus en priorité les points de discorde entre experts, relatifs aux critères réputés être les plus déterminants dans la décision finale. Il s'agit donc d'une analyse des contributions des critères à la performance globale de l'alternative, une analyse de sensibilité qui permette d'identifier localement les critères les plus influents et de traiter les divergences d'opinions sur ces critères en priorité. Pour calculer la distribution agrégée, nous utiliserons le principe donné dans (Grabisch, Nguyen and Walker, 1995) car la méthode certes élégante de (Meyer and Roubens, 2006) basée sur la transformée de Möbius perd de son intérêt dans notre cas d'usage puisque l'on cherche à écrire l'intégrale sous la forme d'une somme de contributions.

6.4.1 Cas monomodal

Dans notre cas, nous avons construit des distributions de possibilités représentant les critères à partir des valeurs imprécises sous forme d'intervalles. L'évaluation globale de l'alternative Al sera représentée par deux distributions agrégées. La première est la distribution agrégée π_{F_1} de l'alternative à partir des distributions approximatives inférieures $\pi_{F_{1,i}}, i=1..n$ de chaque critère ; la deuxième est la distribution agrégée π_{F_2} de l'alternative à partir des distributions approximatives supérieures $\pi_{F_{2,i}}$ de chaque critère. Nous utilisons l'écriture donnée dans la formule (2.22) de la section 5.2, pour chacune des deux distributions agrégées. Ainsi, pour chacune des distributions (notée $\pi_{F_\alpha} | \alpha=1,2$) si toutes les distributions des critères sont monomodales (les données concernant chaque critère sont cohérentes), nous avons, avec les mêmes notations que dans (2.22) :

$$\pi_{F_\alpha} = \bigcup_{l=1..p+1} \pi_{F_\alpha}^l = \bigcup_{l=1..p+1} \sum_{i=1..n} \Delta\mu_i^{\alpha,l} \pi_{F_\alpha,i}^l \quad (2.24)$$

où $\pi_{F_{\alpha,i}}^l$ et $\pi_{F_\alpha}^l$ sont les distributions partielles respectives de $\pi_{F_{\alpha,i}}$ et π_{F_α} et $\Delta\mu_i^{\alpha,l}$ est le coefficient de linéarité rappelé dans (2.21).

6.4.2 Cas multimodal

Dans le cas multimodal, nous avons vu dans la section 6.2 que les données concernant chaque critère c_i par rapport à une alternative Al , peuvent être représentées par deux distributions multimodales (respectivement de q et q' modes) $\pi_{F_{1,i}} = \max_{\beta=1,q_i} \pi_{F_{1,i}}^\beta$ et $\pi_{F_{2,i}} = \max_{\beta=1,q_i} \pi_{F_{2,i}}^\beta$. Comme le traitement des deux distributions inférieure et supérieure est similaire, nous nous limitons au calcul concernant l'une des deux distributions notée $\pi_{F_\alpha,i} = \max_{\beta=1,q_i} \pi_{F_\alpha,i}^\beta$.

Par ailleurs, le théorème de l'union permet d'écrire pour l'opérateur d'agrégation \mathcal{G} et deux distributions multimodales $\pi_i = \max_{\beta_i=1,q} \pi_i^\beta$ et $\pi_{i'} = \max_{\beta'=1,q'} \pi_{i'}^{\beta'}$ correspondant à deux critères distincts i et i' :

$$\mathcal{G}(\pi_i, \pi_{i'}) = \max_{\substack{\beta=1,q \\ \beta'=1,q'}} \mathcal{G}(\pi_i^\beta, \pi_{i'}^{\beta'}) \quad (2.25)$$

Ainsi, pour agréger un ensemble de n distributions de possibilité multimodales, il suffit d'agréger toutes les combinaisons possibles de distributions monomodales. Chaque distribution multimodale représentant un critère i s'écrit : $\pi_i = \max_{\beta_i=1,q_i} \pi_i^{\beta_i}$. Soit \mathcal{B} l'ensemble des n-uplets de toutes les combinaisons possibles d'indices : $\beta \in \mathcal{B}$ signifie que $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$ où $\forall i \in \{1, \dots, n\}, 1 \leq \beta_i \leq q_i$. Ainsi, l'équation (2.24) peut s'écrire pour tout

$\beta \in \mathcal{B} : \pi_{F_\alpha, \beta} = \bigcup_{l=1..p_\beta+1} \pi_{F_\alpha, \beta}^l = \bigcup_{l=1..p_\beta+1} \sum_{i=1..n} \Delta \mu_i^l \pi_{F_\alpha, \beta_i}^l$ où p_β est le nombre de points d'intersections correspondant à des changements d'ordre pour la combinaison β et β_i est l'indice du mode retenu pour la combinaison β pour le $i^{\text{ème}}$ critère ($1 \leq \beta_i \leq q_i$).

Enfin, les deux distributions agrégées représentant l'alternative Al s'écrivent sous la forme suivante :

$$\pi_{F_{\alpha=1,2}} = \bigcup_{\beta \in \mathcal{B}} \pi_{F_\alpha, \beta} \quad (2.26)$$

où π_{F_1} est la distribution agrégée des approximations supérieures $\pi_{F_1, i}$ des critères et π_{F_2} est la distribution agrégée des approximations inférieures $\pi_{F_2, i}$.

6.4.3 Comparaison des alternatives

Les résultats des alternatives doivent être comparés pour légitimer le choix d'une alternative par rapport à une autre. Cela peut se réaliser soit en utilisant les représentations possibilistes des alternatives ou en comparant les indicateurs de ces distributions. En effet, le résultat de la proposition de la formule (2.26), s'il permet de conserver toute l'information des entrées jusqu'à l'agrégation, n'est pas facilement manipulable par un décideur. Il nous paraît souhaitable de prendre le résultat de (2.26), mais d'accompagner la distribution agrégée d'indicateurs qui rendront son interprétation plus aisée. En statistique, le décideur utilise finalement rarement la distribution de probabilité, mais raisonne essentiellement sur sa moyenne et sa variance. Nous proposons donc de définir un ordre de préférence, exploitant les indicateurs présentés précédemment, sur les alternatives permettant de mettre en valeur celles qui semblent *meilleures* pour le décideur.

Pour chaque alternative Al^k un indicateur de position $MD(\pi^k)$ et un indicateur d'imprécision moyenne $\Delta(\pi^k)$ sont calculés comme dans la section 4.5. Un choix évident est de retenir les alternatives appartenant à l'ensemble non-dominé pour le couple $(MD(\pi^k), \Delta(\pi^k))$ au sens de *Pareto* suivant :

$$\begin{aligned} (MD(\pi^k), \Delta(\pi^k)) <_{Pareto} (MD(\pi^{k'}), \Delta(\pi^{k'})) &\Leftrightarrow \\ (MD(\pi^k) + \Delta(\pi^k) < MD(\pi^{k'})) &\text{ ou} \\ (MD(\pi^k) < MD(\pi^{k'}) \text{ et } \Delta(\pi^{k'}) &\leq \Delta(\pi^k)) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Cet ordre s'explique de la façon suivante : une alternative qui possède un plus grand indicateur de position est préférée à une autre à condition qu'elle ne présente pas une imprécision plus grande ou bien alors que la différence entre les deux indicateurs de position soit très significative.

6.4.4 Contributions à l'imprécision de la distribution agrégée

Nous allons maintenant nous intéresser à détecter les divergences d'opinions pour les critères importants dans les évaluations des experts puisque l'objectif est de focaliser le débat sur ces points. Mathématiquement, il s'agit de chercher quelle est la distribution de possibilité des critères qui contribue le plus à l'imprécision sur la distribution agrégée. Cela revient à évaluer l'impact de l'imprécision de chaque distribution sur le processus décisionnel et à identifier quelles évaluations ont le plus contribué à l'imprécision moyenne de la distribution propagée.

Soit pour une alternative Al : π_{F_1} est la distribution agrégée des approximations supérieures $\pi_{F_1,i}$ des critères, π_{F_2} est la distribution agrégée des approximations inférieures $\pi_{F_2,i}$ des critères. Soit aussi $\Delta(\pi_{F_{\alpha=1,2}})$ l'indicateur d'imprécision de la distribution π_{F_α} .

a. Cas monomodal

A l'image de l'écriture linéaire de (2.24), nous cherchons à écrire l'indicateur d'imprécision moyenne de la distribution agrégée sous une forme équivalente. Ceci est justifié dans (Denguir-Rekik, 2007) : l'intégrale de Choquet est linéaire sur chaque zone formée par les points d'intersection des distributions (elles définissent un simplexe), et E_* et E^* (voir section 4.5) sont invariants pour des transformations linéaires d'une distribution. Ainsi, l'indicateur d'imprécision moyenne peut s'écrire : $\Delta(\pi_{F_\alpha}) = \sum_{l=1}^{p+1} \Delta(\pi_{F_\alpha}^l)$ d'après le Théorème 2.1, et on a alors :

$$\Delta(\pi_{F_\alpha}) = \sum_{l=1}^{p+1} \sum_{i=1}^n \Delta \mu_i^{\alpha,l} \Delta(\pi_{F_{\alpha,i}}^l) \quad (2.28)$$

La formule (2.28) peut aussi s'écrire de la manière suivante :

$$\Delta(\pi_{F_\alpha}) = \sum_{i=1}^n \Upsilon_{\alpha i \Delta} \quad (2.29)$$

où $\Upsilon_{\alpha i \Delta} = \sum_{l=1}^{p+1} \Delta \mu_i^{\alpha,l} \Delta(\pi_{F_{\alpha,i}}^l)$ est la contribution de l'indicateur d'imprécision moyenne relative à l'évaluation du $i^{\text{ème}}$ critère à l'imprécision moyenne de la distribution agrégée.

b. Cas multimodal

Soit N distributions de possibilité affines par morceaux π_1, \dots, π_N . Soit π l'union de ces distributions $\pi = \bigcup_{i=1..N} \pi_i$. La distribution π peut être réécrite comme l'union de distributions

de possibilité $\bigcup_{i=1..p+1} \pi_i'$ où les distributions π_i' sont les distributions adjacentes construites depuis les distributions $\pi_{i,1..N}$ (non nécessairement normalisées) (cf. Figure 2.2) et où p est un entier inférieur ou égal au nombre de points d'intersection entre les distributions $\pi_{i,1..N}$.

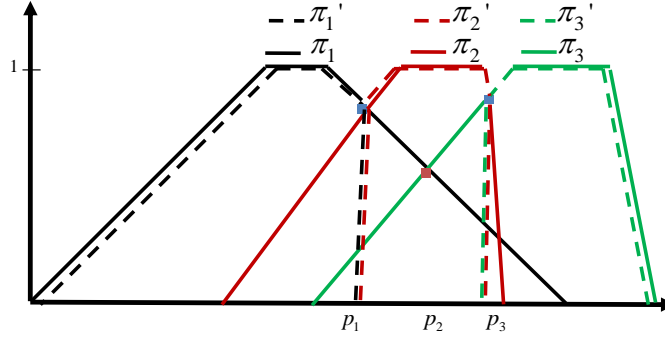


Figure 2.2 : Les distributions partielles de l'union de distributions de possibilité

Corollaire 2.1 : dans le cas multimodal, l'indicateur de dispersion moyenne $\Delta(\pi_{F_\alpha})$ de la distribution π_{F_α} peut s'écrire de la façon suivante :

$$\Delta(\pi_{F_\alpha}) = \sum_{i=1}^n \Upsilon_{ai\Delta} \quad (2.30)$$

Preuve : dans le cas multimodal, nous avons la formule (2.26) : $\pi_{F_{\alpha=1,2}} = \bigcup_{\beta \in B} \pi_{F_\alpha, \beta} \cdot \pi_{F_{\alpha=1,2}}$ est

réécrite comme l'union de distributions adjacentes $\pi_{F_{\alpha=1,2}} = \bigcup_{\beta \in B} \pi'_{F_\alpha, \beta}$ comme expliqué sur la

Figure 2.2. Le résultat du corollaire est alors obtenu en appliquant le Théorème 2.1 et la formule (2.29) aux distributions $\pi'_{F_\alpha, \beta}$ ■

6.4.5 Identification des critères à débattre

Durant le débat, lorsque l'on identifie que les experts sont en désaccord sur l'évaluation de certains critères, il est nécessaire d'orienter le débat sur les critères les plus importants. Les critères qui ont une forte importance relative et une forte imprécision moyenne vont contribuer significativement à l'imprécision moyenne de la distribution agrégée : le désaccord des experts sur un critère décisif nuit gravement à la fiabilité de la décision. Une recommandation utile au décideur peut être de lui retourner le sous-ensemble de critères qui à eux seuls expliquent une part significative de l'imprécision moyenne de l'évaluation agrégée π^k d'une alternative Al^k . Cette recommandation introduit un coefficient $\beta \in [0,1]$ et fournit un sous-ensemble de critères I^* qui contribuent à hauteur de $(100.\beta)\%$ à l'imprécision

moyenne de l'évaluation globale de l'alternative Al^k . Cet ensemble est déterminé de la façon suivante :

$$I^* = \underset{I \in 2^{(1,n)}}{\operatorname{Argmin}} \left\{ \sum_{i \in I} \Upsilon_{i\Delta} / \sum_{i \in I} \Upsilon_{i\Delta} > \beta \Delta(\pi^k) \right\} \quad (2.31)$$

où le coefficient β est choisi par le décideur.

Le décideur peut utiliser cette information pour recommander aux experts de focaliser leur attention sur les critères de I^* : les désaccords sur les évaluations expertes des critères de I^* sont à l'origine d'une part très significative de l'imprécision constatée au final. Il est urgent que les experts vérifient leurs évaluations sur les critères de I^* : sachant que les experts n'expriment leur opinion que sur les critères de leur domaine de compétence, soit il y a eu une erreur d'évaluation pure et simple d'un expert, soit il y a vraiment un point à débattre parce que deux écoles de pensée s'affrontent au sein des experts. En tout cas, ce sont les « incertitudes » sur les critères de I^* qui doivent être résolues en premier lieu si le décideur veut y voir plus clair rapidement. Ainsi, nous obtenons une boucle de rétroaction (voir la Figure 2.3), où $\mathcal{G} = C_\mu$, est une intégrale de Choquet, qui sert à orienter le débat des experts sur les critères de I .

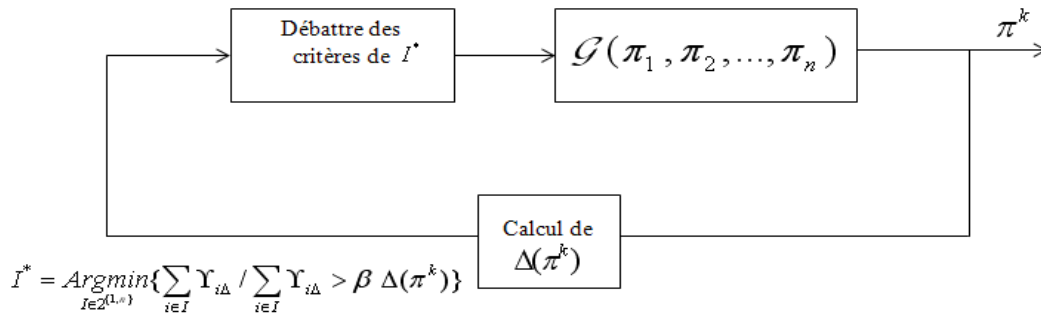


Figure 2.3 : La boucle de rétroaction pour orienter le débat d'experts

7. Exemple d'illustration : la décision en cellule de crise

Nous allons maintenant appliquer le modèle qui vient d'être décrit sur un exemple afin d'illustrer le processus de décision en cellule de crise. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ANR ISyCri.

La situation considérée ici fait référence à un accident simulé présenté dans le cadre du projet ANR ISyCri. Le projet ISyCri s'est intéressé à la gestion de situations de crise sur deux plans en particulier : d'une part, la coordination des réactions génériques définies par les divers partenaires (réactivité), d'autre part, l'adaptabilité de cette réaction collective à l'avancement dans la situation de crise (flexibilité). Une caractéristique du projet ISyCri était de se pencher

simultanément sur ces deux thématiques afin de conduire une approche exhaustive de la problématique « crise » (Benaben et al., 2008) (Couget et al., 2007). De notre côté, nous nous sommes plus particulièrement penchés sur les décisions concernant l'adaptabilité du collectif à l'évolution de la situation. Les décisions sont perçues comme des processus délibératifs entre des acteurs de cultures différentes partageant un même objectif global—sortir de la crise. Cependant chaque acteur ne peut se référer qu'à une vision parcellaire de la situation (son propre système d'information, son objectif propre, ses règlements et contraintes spécifiques, etc.). Parvenir à une représentation consensuelle de la situation à un instant donné est l'une de ces décisions cruciales : sans une représentation communément admise de la crise, il ne saurait y avoir une coordination pertinente et cohérente du collectif d'acteurs, de déploiement d'un plan d'actions concerté adapté à une perception de la crise toujours actualisée. Nous avons abordé la décision en cellule de crise comme un processus de décision collective où le chef de cellule (le préfet par exemple) entend chacun des acteurs de la cellule, consulte des experts pour construire une représentation fiable de la situation au plus vite afin d'agir efficacement dans les meilleurs délais.

Le scénario de crise est le suivant. L'accident s'est produit à un passage à niveau. Un camion transportant un produit toxique inconnu est percuté par un train de voyageurs au passage à niveau. Il y a de nombreux blessés et la citerne du camion prend feu. La plaque d'identification du produit transporté par le camion dont on ne connaît pas la provenance est illisible. Les gendarmes et les pompiers sont appelés. Une cellule de crise est installée. Les abords du passage à niveau sont dégagés, les routes bloquées pour permettre le déploiement des secours. Les flammes atteignent le moteur du camion. Les pompiers donnent les premiers soins aux traumatisés. Le réservoir du camion s'enflamme. Le SAMU est appelé pour traiter les victimes et les envoyer vers les infrastructures adéquates. La citerne du camion semble perforée et un gaz s'en échappe. La crise s'est complexifiée en l'espace de quelques minutes, la gravité de la situation prend une autre dimension. Le chef de la cellule de crise doit décider si « *la zone doit être évacuée* » ou « *pas* ». La décision est lourde de conséquences et le préfet qui en porte la responsabilité consulte chacun de ses experts avant de prendre sa décision.

Chacun des experts a un point de vue partiel de la crise relatif à son domaine d'expertise. Le préfet ne le consulte qu'à ce titre. Chaque opinion est donc supposée pertinente pour le préfet puisque relevant d'un avis de spécialiste. Le préfet ne saurait donc utiliser une procédure de vote pour fusionner l'avis des experts : l'avis E^j d'un seul expert "aura autant de poids" que l'avis E^j des quatre autres, tout point de vue quel qu'il soit ne peut être négligé. Ce n'est pas le nombre d'experts qui pensent E^j ou E^j qui importe, mais le fait qu'il existe deux évaluations distinctes. Si E^j et E^j sont très différentes alors il y a un conflit entre les points de vue des experts et c'est ce que doit s'efforcer de résoudre en priorité le préfet s'il veut arriver à une décision. Les divergences d'opinions entre experts sont les sources d'incertitudes auxquelles une attention particulière doit être prêtée.

La décision d'évacuer relève de plusieurs critères d'évaluation. Il va de soi qu'il y a les dimensions des conséquences physiques et psychologiques de la décision. Les risques

d'échappement d'un gaz potentiellement toxique sont une menace pour l'environnement. Il s'agit donc de minimiser le nombre de blessés, les chocs psychologiques et l'impact sur l'environnement tout en ayant en tête que la gestion de cette crise ne pourra être un succès que si les décisions retenues ont un coût justifié et qu'elles ont convenablement été relayées auprès des media. Le zéro erreur mais pas à n'importe quel prix. La crise de la grippe H1N1 en 2009 en a été un parfait exemple : sur le plan médical, les conséquences de la « pandémie » ont été très limitées et on ne peut que s'en féliciter, mais la campagne de vaccination sur un plan économique et médiatique a été un désastre : une crise à elle seule !

Chaque acteur de la crise apporte un éclairage propre à son domaine d'expertise. C'est sur la base de l'ensemble de ces avis que chacune des alternatives sera évaluée par le préfet. Bien sûr, l'évaluation d'un critère pour une alternative donnée peut différer d'un acteur à l'autre : deux écoles de pensée peuvent conduire à des interprétations différentes des mêmes observations. Autrement dit les experts peuvent fournir des évaluations conflictuelles, voire contradictoires sur une même alternative et pour un même critère (différence de point de vue). L'idée est donc de représenter cette pluralité d'avis par des distributions d'avis pour chaque critère, puis pour chaque alternative. L'expertise repose sur l'interprétation d'observations quantitatives et/ou qualitatives via des connaissances essentiellement qualitatives : l'évaluation sera donc nécessairement imprécise. Les avis que peuvent fournir les experts ne sauraient être précis à cause de l'incomplétude des informations dont ils disposent sur le système à un instant donné ; ils peuvent par exemple, faire des comparaisons avec des situations proches et exploiter les retours d'expérience sur des accidents passés pour construire leur avis. La fusion se fait en deux étapes : i) collecte des avis par critère et représentation de la diversité des opinions par le biais d'une distribution d'évaluations imprécises ; ii) agrégation des distributions élémentaires des critères pour évaluer les alternatives.

Dans l'exemple ISyCri, cinq experts sont identifiés par le chef de la cellule pour donner leur avis sur la situation. Leurs expertises reposent sur les cinq critères relatifs aux conséquences physiques, psychologiques et environnementales, médiatiques et économiques. Les critères ont été choisis assez génériques afin qu'ils puissent être appliqués à plusieurs types de crise. Leur importance relative et leurs interactions ont été déterminées de manière empirique selon les règles suivantes :

- L'importance relative des conséquences physiques est supérieure à celle des conséquences psychologiques et environnementales ;
- Les conséquences médiatiques constituent un facteur de décision plus fort que les conséquences économiques ;
- Une gestion de crise sans dommages physiques, psychologiques et environnementales ne saurait être un succès sans une bonne communication et une gestion financière efficace (voire l'épisode de la grippe H1N1 en 2009).

Nous avons choisi d'approcher ce comportement décisionnel par une intégrale de Choquet 2-additive. Les importances relatives et les interactions sont données sur la capture d'écran de la Figure 2.5 depuis le SIADG que nous avons développé pour le projet ISyCri. Les indices de

Shapley accordés à chacun des critères : conséquences physiques, psychologiques, environnementales, médiatiques et économiques sont respectivement : 0.3, 0.2, 0.2, 0.2 et 0.1. Les interactions sont : $I_{\text{économique, physique}} = 0.05$, $I_{\text{économique, psychologique}} = 0.05$, $I_{\text{médiatique, physique}} = 0.1$, $I_{\text{médiatique, psychologique}} = 0.1$, $I_{\text{médiatique, environnementale}} = 0.1$ et $I_{\text{économique, environnementale}} = 0.05$. Les valeurs numériques de ces paramètres ont été affectées de manière empirique. Cependant, des méthodes de type Macbeth étendues à Choquet peuvent être utilisées pour calculer ces paramètres dans le cas de problématiques plus contraintes mais ce point ne rentre pas dans le cadre de notre étude. La Figure 2.4 ci-dessous illustre l'attitude décisionnelle ou modèle de préférences stratégiques du chef de crise modélisée par une intégrale de Choquet 2-additive.

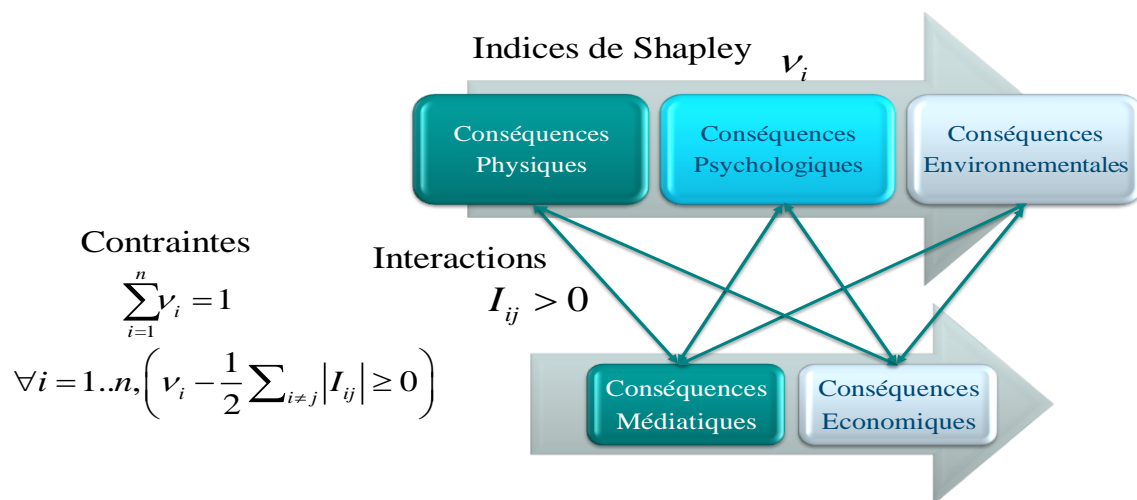


Figure 2.4 : L'intégrale de Choquet 2-additive pour les cinq critères de la gestion de crise

FAE : Saisie des noms des critères, des alternatives, des poids et des interactions pour le projet 'Marsac' :

Les alternatives :

Evacuer Ne pas evacuer

Les critères :

Conséquences Physiques Conséquences Psychologiques Conséquences Economiques Conséquences Mediatiques Conséquences Environnementales

Les poids des critères :

0.3 0.2 0.1 0.2 0.2

Les interactions :

	0	0.05	0.1	0
		0.05	0.1	0
			0	0.05
				0.1

Confirmer

Figure 2.5 : Saisie des préférences du décideur

Chaque expert exprime alors son avis sur les critères en rapport avec son domaine d'expertise en utilisant l'interface de saisie présentée dans la Figure 2.6.

FAE : Evaluation des alternatives par l'expert 'SMITH' :

Evacuer **Ne pas evacuer**

Pensez-vous qu'en choisissant l'alternative Evacuer, on contribue à limiter les Conséquences Physiques : ?

Alternative	Expert	Critère	Score
Evacuer	SMITH	Conséquences Physiques :	[6,8]

Conséquences Physiques : Non Oui

Conséquences Psychologiques : Non Oui

Conséquence Economiques : Non Oui

Conséquences Mediatiques : Non Oui

Conséquences Environnementales : Non Oui

Commentaires :

Les évaluations des acteurs sont imprécises, elles correspondent à des sous intervalles de [0,20].
 * Interprétation des évaluations : Une évaluation $[x1,x2]$ de l'acteur "ACT" d'un critère "CR" pour une alternative "ALT" est interprétée de la façon suivante : selon l'acteur "ACT", si l'alternative "ALT" est choisie, le degré de satisfaction du critère "CR" appartient à l'intervalle $[x1,x2]$

Confirmer ...

Figure 2.6 : Evaluation des alternatives par l'expert SMITH

Sur la Figure 2.6, l'expert *SMITH* pense que l'alternative « évacuer » est plutôt insatisfaisante sur le plan des dommages physiques. Il pense que l'évacuation monopoliserait les véhicules de service et les routes principales, ce qui pourrait nuire à une gestion efficace de l'évacuation des blessés. Pour saisir son opinion, l'expert déplace le curseur sur la règle graduée qui va de « oui » à « non ». Un curseur positionné sur le « non » signifie que l'alternative est totalement insatisfaisante au regard du critère analysé, un curseur positionné sur le « oui » signifie que l'alternative est parfaitement satisfaisante au regard du critère. Toutes les évaluations des experts sont synthétisées dans le Tableau 2.1. Les intervalles dans le Tableau 2.1, représentent l'opinion imprécise exprimée par chaque expert à travers l'interface.

Les avis des experts					
	Conséquences Physiques	Conséquences Psychologiques	Conséquence Economiques	Conséquences Médiatiques	Conséquences Environnementales
Expert SMITH					
Evacuer	[6,8]	Sans opinion	Sans opinion	Sans opinion	Sans opinion
Ne pas évacuer	[12,14]	[13,15]	Sans opinion	Sans opinion	[15,17]
Expert 2					
Evacuer	Sans opinion	[6,8]	Sans opinion	Sans opinion	Sans opinion
Ne pas évacuer	[13,15]	[12,14]	Sans opinion	Sans opinion	[15,17]
Expert 3					
Evacuer	Sans opinion	Sans opinion	[6,8]	Sans opinion	Sans opinion
Ne pas évacuer	[13,15]	[15,17]	[15,17]	[8,10]	[13,15]
Expert 4					

Evacuer	[4,6]	Sans opinion	[4,6]	Sans opinion	[4,6]
Ne pas évacuer	Sans opinion	Sans opinion	[15,17]	[7,9]	Sans opinion
Expert 5					
Evacuer	Sans opinion	Sans opinion	Sans opinion	[8,10]	[8,10]
Ne pas évacuer	[4,6]	[4,6]	[15,17]	[7,9]	Sans opinion

Tableau 2.1 : Evaluations des experts

La Figure 2.7 présente le résultat de la fusion de l'alternative « évacuer » sur le critère « Conséquences physiques » : elle résulte des évaluations recueillies dans la colonne de gauche du Tableau 2.1. En plus de l'approximation inférieure (distribution de nécessité pour l'ensemble d'intervalles emboîtés construits sur la base des intervalles fournis par les experts) et l'approximation supérieure (distribution de possibilité), sont présentées sur la figure deux distributions approchées (distribution approchée unique de la fusion choisie pour ne pas propager lors de l'agrégation à la fois les distributions de nécessité et de possibilité) : la distribution trapézoïdale et la distribution moyenne. Les quatre distributions construites ont des degrés de possibilité non nuls pour les évaluations appartenant à l'intervalle [4,8] (support des distributions) et c'est aussi l'ensemble des scores totalement possibles (les noyaux des distributions) pour toutes les distributions. L'analyse des indicateurs calculés sur la partie droite de la Figure 2.7 nous indique que les distributions ont sensiblement la même valeur pour l'indicateur de position et l'indicateur d'imprécision. La distribution résultat de la fusion des avis d'experts sur le critère « Conséquences physiques » met en évidence la divergence d'opinions entre les experts (imprécision moyenne de la distribution) qui existe sur ce critère pour l'alternative « évacuer ». Les avis restent néanmoins cohérents : bien que les avis soient divergents, la distribution d'avis ne comporte qu'un mode (la distribution du critère est monomodale).

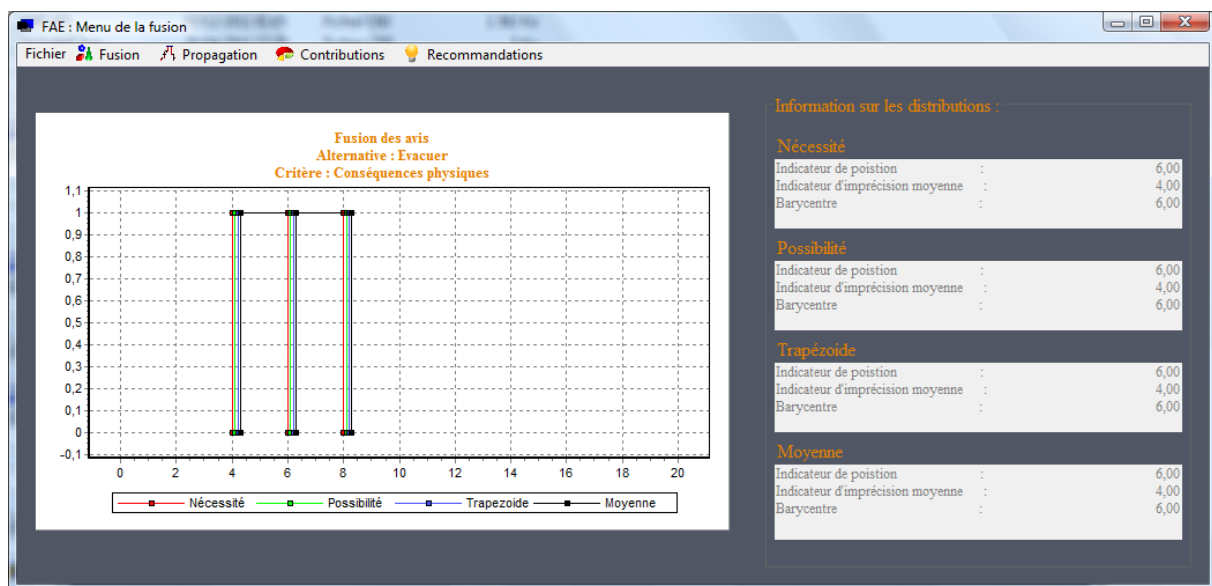


Figure 2.7 : Le résultat de la fusion pour le critère « Conséquences physiques » (cas de l'alternative « évacuer »)

Concernant le même critère « *Conséquences physiques* », les experts ne sont pas unanimes sur la satisfaction de l'option « *Ne pas évacuer* ». Les évaluations recueillies présentent deux points de vue opposés. L'expert « *SMITH* », l'expert « *2* » et l'expert « *3* » affichent des avis satisfaisants alors que l'expert « *5* » affiche un avis insatisfaisant. Cela explique l'incohérence présente dans les distributions construites pour la fusion de ces avis (voir la Figure 2.8). En effet, les distributions construites sont bimodales : le premier mode représente l'avis de l'expert « *5* » et le deuxième les avis des trois autres experts. Pour le deuxième mode, par exemple, l'ensemble des scores totalement possibles (les noyaux des distributions) est différent d'une distribution à l'autre. Ainsi, la distribution de nécessité est bien sûr la plus précise par construction parmi les quatre distributions et a pour noyau [13,14]. L'analyse des indicateurs nous indique que la distribution de nécessité et la distribution moyenne sont plus précises que les deux autres. Pour une même valeur moyenne, on voit bien que le décideur ne prendra peut-être pas la même décision selon le modèle d'où l'importance de ne pas se fier uniquement qu'aux moments des distributions.

Le processus de fusion est appliqué aux autres critères et cela pour les deux alternatives comparées.

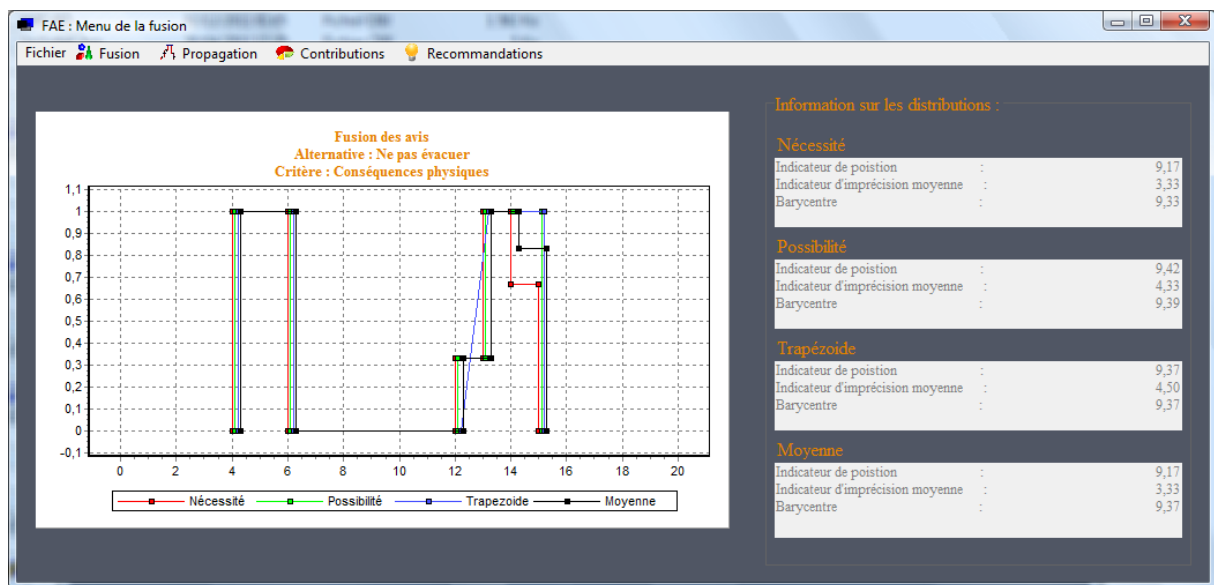


Figure 2.8 : Le résultat de la fusion pour le critère « *Conséquences physiques* » (cas de l'alternative « *Ne pas évacuer* »)

Ensuite vient l'étape d'agrégation. Les distributions issues de la fusion des avis se rapportant à chacun des cinq critères doivent maintenant être agrégées pour obtenir un critère de synthèse unique qui facilitera la comparaison des alternatives pour le chef de cellule. Les calculs sont faits pour les quatre types de distribution (nécessité, possibilité, moyenne et approximation trapézoïdale). L'agrégation des distributions partielles des critères se fait avec l'intégrale de Choquet dont les paramètres sont fournis sur la Figure 2.5. La Figure 2.9 montre le résultat de l'agrégation pour l'alternative ($k=1$) « *Evacuer* » et la Figure 2.10 montre celui de l'alternative ($k=2$) « *Ne Pas Evacuer* ».

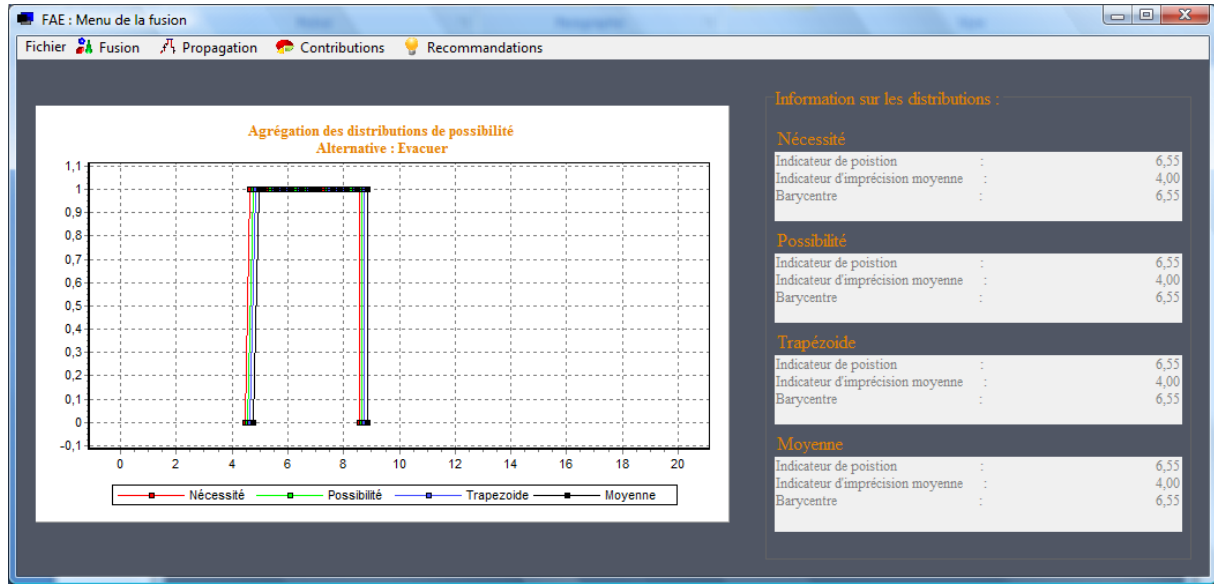


Figure 2.9 : Agrégation des distributions des critères pour l'alternative « Evacuer »

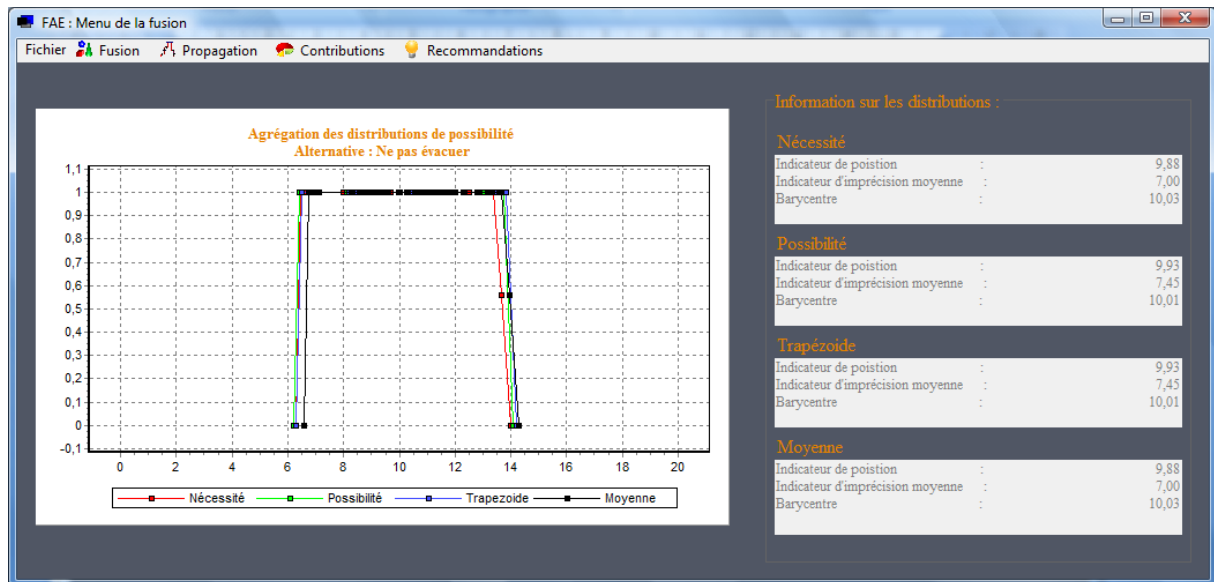


Figure 2.10 : Agrégation des distributions des critères pour l'alternative « Ne Pas Evacuer »

Pour les deux alternatives, l'agrégation des distributions des critères donne approximativement le même résultat quel que soit le type de distribution utilisé dans le processus de fusion (nécessité, possibilité, moyenne, approximation trapézoïdale). Comme pour le cas de la fusion, une analyse par indicateurs accompagne les deux distributions.

Le noyau de la distribution agrégée de l'alternative « Evacuer » est $[4.25, 8.5]$ et $[6.2, 14]$ (le plus large) pour l'alternative « Ne Pas Evacuer ». En outre, si on considère la distribution moyenne nous avons $(MD(\pi^{Al^1}), \Delta(\pi^{Al^1})) = (6.55, 4)$ et $(MD(\pi^{Al^2}), \Delta(\pi^{Al^2})) = (9.88, 7)$ ce qui implique le résultat suivant : $(MD(\pi^{Al^1}), \Delta(\pi^{Al^1})) \not\prec_{Pareto} (MD(\pi^{Al^2}), \Delta(\pi^{Al^2}))$. Cela signifie

que les deux alternatives ne sont pas comparables au sens de *Pareto* (2.27) puisque l'on a : $6.55 + 4 = 10.55 > 9.88$ et $\Delta(\pi^{Al^1}) > \Delta(\pi^{Al^2})$.

L'indicateur de dispersion des deux alternatives est relativement élevé. Cette dispersion est due aux avis contrastés des experts sur les mêmes critères. L'analyse de cette dispersion nous amène à calculer la contribution de chaque critère à cette dispersion globale des scores des alternatives. La Figure 2.11 et la Figure 2.12 (elles se rapportent toutes deux à un modèle de fusion de type nécessité) montrent que les critères « *conséquences physiques* » et « *conséquences psychologique* » contribuent le plus significativement à l'imprécision moyenne des distributions agrégées des deux alternatives.

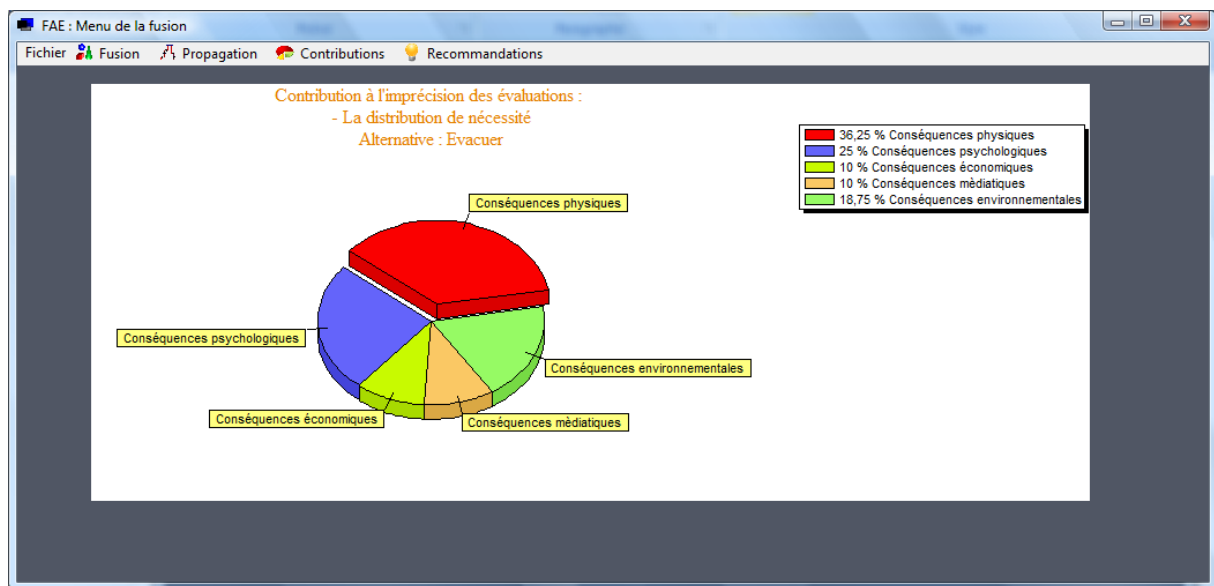


Figure 2.11 : Contributions des critères à l'imprécision moyenne de la distribution de nécessité agrégée de l'alternative « *Evacuer* »

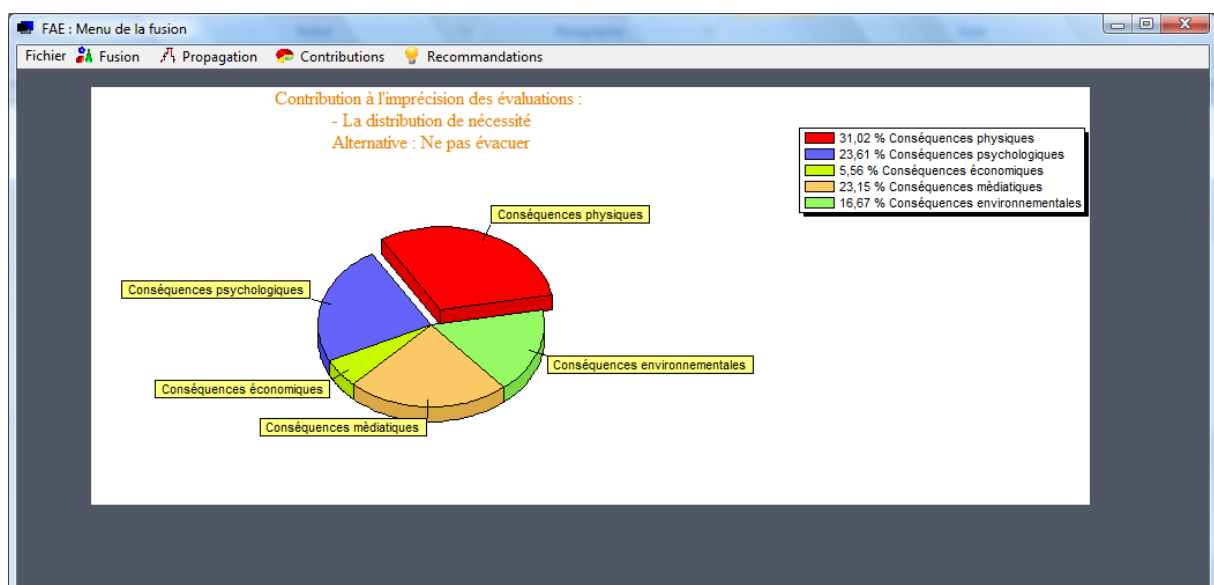


Figure 2.12 : Contributions des critères à l'imprécision moyenne de la distribution de nécessité agrégée de l'alternative « *Ne Pas Evacuer* »

A partir de cette analyse des résultats en termes de contributions à l'imprécision moyenne des évaluations des options, il ressort que plus de 30% de l'imprécision provient des critères « *conséquences physiques* » pour les deux alternatives. Pour l'alternative « *Evacuer* », ce sera donc le critère qui sera soumis à nouveau aux experts pour essayer d'expliquer les raisons de cette divergence d'opinions (observation, interprétation, compréhension, école de pensée, responsabilité professionnelle, etc.). Pour l'alternative « *Ne Pas Evacuer* », outre le critère précédent, interviennent aussi dans l'imprécision de l'évaluation globale, les critères « *conséquences médiatiques* » et « *conséquences psychologiques* » : les experts sont très partagés sur la réaction des médias s'ils décidaient de ne pas évacuer. Certains pensent que ce serait plutôt une erreur selon le principe de précaution, d'autres pensent que l'information d'évacuation relayée par les médias serait à l'origine d'une possible panique néfaste à la gestion de la crise. Le chef de cellule dispose ainsi de l'information nécessaire pour amener ses experts à revenir sur les points sensibles donnant lieu à des divergences de points de vue et ayant un impact fort sur la décision finale. Le débat d'experts est gouverné en utilisant « l'entropie » (ou plutôt l'imprécision moyenne) sur les points cruciaux relatifs à des facteurs décisionnels à forte incidence comme variable régulée. Dans le cas présent, cette imprécision empêche le décideur de comparer les deux alternatives. Comme l'alternative « *Ne Pas Evacuer* » présente une très grande imprécision moyenne $\Delta(\pi^{Al^2}) = 7$, le décideur doit commencer par demander aux experts de revoir leur avis sur les critères « *conséquences physiques* » et « *conséquences psychologiques* » qui contribuent le plus à cette imprécision. Comme présenté plus haut, nous avons trois experts qui partagent des informations cohérentes sur ces critères et un expert qui n'a pas le même point de vue. Si on suppose que cet expert isolé finit par rallier l'avis des autres experts, ses avis seront alors répartis de la façon suivante. Ces nouveaux avis sont présentés dans le Tableau 2.2 .

Les avis des experts					
	Conséquences Physiques	Conséquences Psychologiques	Conséquences Economiques	Conséquences Médiatiques	Conséquences Environnementales
Expert 5					
Evacuer	Sans	Sans opinion	Sans opinion	[8,10]	[8,10]
Ne pas évacuer	[12,14]	[12,14]	[15,17]	[7,9]	Sans opinion

Tableau 2.2 : Changement des avis de l'expert 5

Par exemple pour le critère « *conséquences physiques* », les nouvelles distributions de fusion présentées dans la Figure 2.13 mettent en évidence le rapprochement des avis. Si la distribution moyenne reste une « bonne » approximation des distributions inférieure et supérieure pour cet exemple, la distribution trapézoïdale quant à elle en est un contre exemple. En effet, son indicateur de dispersion moyenne est égal à celui de la distribution supérieure, ce qui signifie qu'une incertitude supplémentaire existe qui ne provient pas des avis des experts mais de l'approximation utilisée.

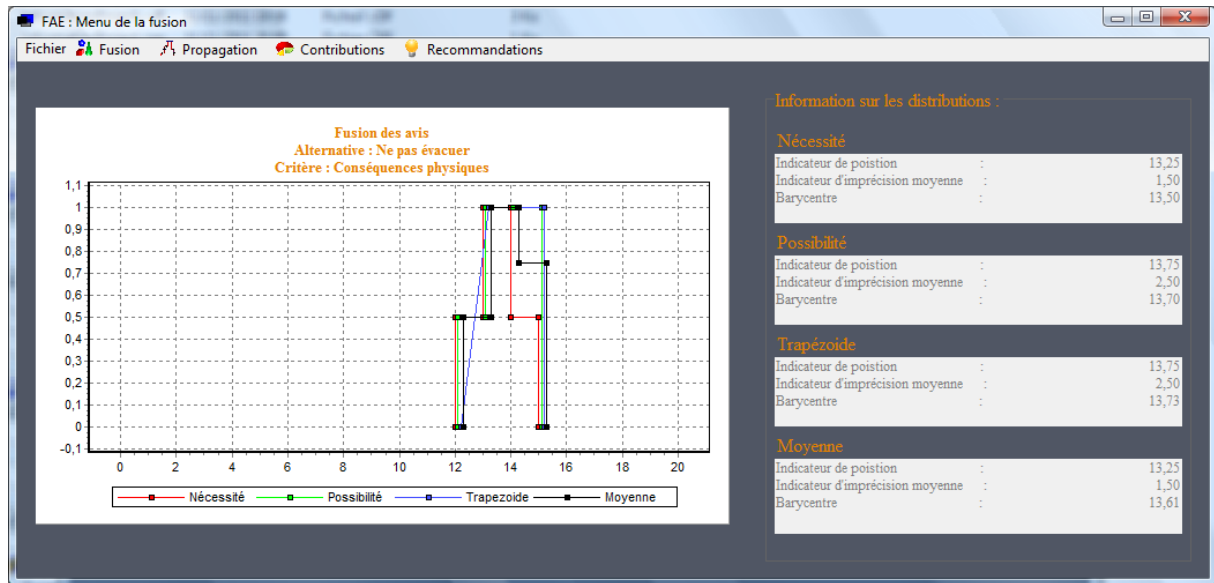


Figure 2.13 : Distributions construites après le changement des avis pour le critère « conséquences physiques »

A partir des nouvelles données, la Figure 2.14 montre les nouvelles distributions agrégées de l'alternative « *Ne Pas Evacuer* ».

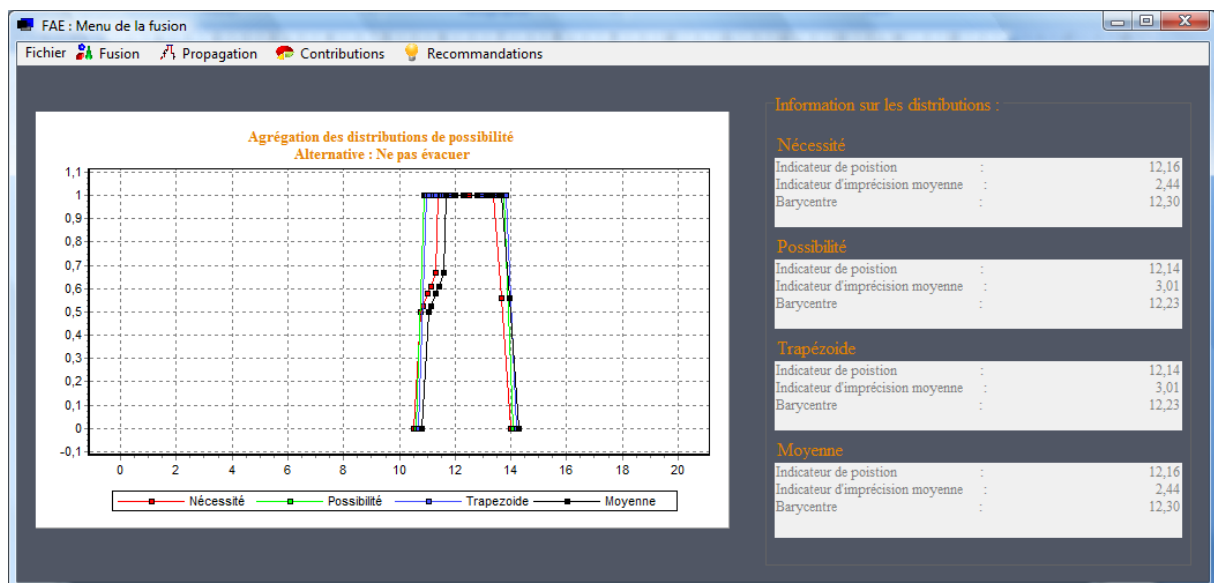


Figure 2.14 : Nouvelles agrégations des distributions des critères

Cette fois, nous avons $(MD(\pi^{Al^1}), \Delta(\pi^{Al^1})) \prec_{Pareto} (MD(\pi^{Al^2}), \Delta(\pi^{Al^2}))$ car $6.55 + 4 = 10.55 < 12.16$. Cela signifie que l'alternative « *Ne Pas Evacuer* » est préférée à l'alternative « *Evacuer* » au sens de *Pareto*.

8. Conclusion

Ce chapitre s'est intéressé à l'un des quatre types de décision collective mis en évidence dans le chapitre précédent. Il s'agit du cas où il n'existe qu'un décideur à proprement parler dans le groupe, *i.e.*, celui qui endosse la responsabilité de la décision, les autres acteurs étant là pour le conseiller dans son évaluation et ses choix. Le décideur peut être alors vu comme le détenteur de la stratégie : c'est de lui qu'émane le modèle de décision ou de préférences. On est bien dans l'hypothèse d'un modèle rationnel de la décision : la question de la subjectivité du modèle ne se pose pas puisque c'est un acteur unique qui décide du bien fondé du modèle (quitte à ce qu'il ait à en rendre compte a posteriori). La part de subjectivité réside davantage dans les avis d'experts qui interprètent la situation selon leur domaine d'expertise. Il s'agit donc à notre sens d'une décision d'organisation, où les acteurs de la décision partagent des objectifs communs (ceux arrêtés par le décideur unique), mais ont des interprétations différentes de la situation. Le décideur doit tirer le meilleur parti des conseils et recommandations qui lui sont proposés. Le pilotage de la décision consiste à réduire au plus vite et au mieux les divergences de point de vue afin de décider plus sereinement et de pouvoir justifier ses choix (Figure 1.11).

Nous avons proposé un modèle pour l'évaluation des alternatives concurrentes qui se décompose en deux étapes : fusion des avis d'experts pour chaque critère sous la forme de distributions possibilistes, puis agrégation de ces distributions. Nous avons passé en revue plusieurs techniques qui permettent une fusion optimale. Ceci nous a permis d'étendre et de rendre plus précise la méthode de fusion présentée dans la section 4.3. En ce qui concerne l'agrégation de distributions de possibilité par l'intégrale de Choquet, tout se passe comme si l'on propageait les incertitudes des évaluations partielles des critères sur l'évaluation globale via l'opérateur d'agrégation. Nous avons ensuite muni les distributions agrégées d'indicateurs de décision afin de faciliter l'interprétation des résultats par le décideur. En particulier, l'indicateur de dispersion mesuré par l'imprécision moyenne d'une distribution de possibilité nous fournit les critères sur lesquels il n'y a pas d'avis unanime. Une analyse de sensibilité en termes de contributions marginales de cet indicateur nous a fourni un moyen de piloter le débat d'experts pour lever au plus vite toute ambiguïté pouvant significativement affecter la décision. Cette boucle de rétroaction sur l'imprécision moyenne fournit le moyen de contrôle qui semble faire défaut à la méthode Delphi par exemple. En effet, celle-ci traite indifféremment toute incertitude dans les dires d'experts puisque sans l'adjonction d'une évaluation multicritère, Delphi ne peut identifier les critères jouant effectivement un rôle discriminant dans la décision.

Nous avons développé un outil logiciel qui supporte à la fois la construction des distributions d'avis d'experts pour plusieurs méthodes de fusion, qui calcule les distributions agrégées et restitue l'analyse de sensibilité des indicateurs des distributions sous une forme facilement interprétable par le décideur qui peut donc utiliser l'outil pour diriger son débat d'experts au plus vite vers un consensus lorsque cela est possible bien sûr. Cet outil pourrait très bien être utilisé comme support mathématique et informatique à la méthode de communication Delphi.

Ce système interactif d'aide à la décision de groupe (SIADG) instrumente le premier type de décision collective identifié dans le Figure 1.11 et contribue ainsi à outiller le management d'activités à risques en termes de supports informatiques et mathématiques pour l'aide à la décision. Le SIADG doit permettre de réduire les erreurs de la dimension cognitive en gérant pour le décideur l'imprécision et l'incertitude des évaluations, le modèle de la stratégie de choix et les fonctionnalités d'explication par la contribution des critères ; son système de pilotage de la délibération doit également diminuer les erreurs de la dimension collective en proposant une aide à la coordination, l'orchestration.

En résumé nos contributions ont entre autres porté sur les points suivants :

- Le modèle possibiliste permet de représenter au mieux la variabilité d'opinions exprimées par des experts, intrinsèquement porteuses d'imprécision et d'incertitude. Nous avons décomposé les étapes de fusion et d'agrégation dans l'évaluation multicritère d'options par un groupe d'experts. Ceci nous a alors amené à élaborer une méthode de fusion plus rigoureuse que celle proposée dans (Denguir-Rekik, 2007) ;
- Nous avons étendu par ailleurs l'agrégation à des distributions de possibilité affines par morceaux quelconques ce qui nous a permis d'être plus précis qu'avec les approximations trapézoïdales et de fournir un encadrement des distributions qui nous permet de minimiser la perte d'information ;
- L'intégrale de Choquet nous a permis de modéliser l'importance relative et les interactions des critères. De cette forme analytique du modèle de préférences, une analyse de sensibilité nous a permis de concevoir un système de contrôle du débat par l'« entropie » sur les facteurs majeurs de la décision et de proposer ainsi un support mathématique et informatique lorsque les jugements d'experts concernent plusieurs facteurs décisionnels ;
- La méthode et l'outil informatique traitent le cas de distribution d'avis incohérents, représentés par des distributions multimodales ;
- Nous avons mis en correspondance un modèle mathématique et un outil informatique pour répondre au premier type de décision collective du Figure 1.11, celui d'une décision d'organisation, où les acteurs de la décision partagent des objectifs communs, mais ont des interprétations différentes de la situation et où le pilotage de la décision consiste donc à réduire ces divergences de points de vue pour parvenir à une décision sûre.

Chapitre 3. Influence dans un réseau social et pilotage de la délibération

1. Introduction

Dans le chapitre précédent le pilotage du débat d'experts reposait sur la détection des points de divergences d'opinions des experts les plus importants pour la décision afin de les débattre en priorité. Cependant, on n'y expliquait pas comment les experts débattent sur chacun des points de divergence qui ont été relevés. Nous allons maintenant nous focaliser sur le débat entre experts à travers deux notions importantes. En effet, d'une part, nous abordons l'échange des arguments entre les experts lorsqu'ils revoient leur opinion, et d'autre part, nous introduisons une autre dimension plus « politique » du pilotage de la dynamique du débat, celle de l'influence dans un réseau social.

Ce chapitre traite donc des configurations multi acteurs où la décision collective s'apparente à une délibération collective argumentée où chacun tâche de faire valoir son opinion avec ses arguments construits sur ses croyances et ses objectifs individuels. Il s'agit d'un problème de décision d'organisation ou de groupe (cf. Figure 1.11 du Chapitre 1). Il correspond à la situation où des agents autonomes munis de capacité de raisonnement et pouvant avoir des connaissances ou des préférences contradictoires interagissent pour résoudre un problème commun. Des conflits peuvent émerger de leurs interdépendances et la négociation est un mécanisme nécessaire pour trouver des consensus mutuellement acceptables. Dans un tel processus l'argumentation permet la justification des choix des agents. Ce chapitre peut donc être vu comme un complément au précédent puisqu'il aborde la notion d'arguments seulement suggérée dans la résolution de conflits dans le chapitre précédent. La notion d'influence entre les acteurs de la décision y est aussi introduite. Et par là, contrairement au chapitre précédent, il s'agit bien là de se focaliser sur la manière dont « l'entropie » peut diminuer durant le débat d'experts. Le chapitre précédent posait la question du « que contrôler » pour tenter d'obtenir un consensus entre experts, celui-ci s'intéresse au « sur quoi et comment s'exerce ce contrôle » au niveau de la logique décisionnelle de chaque acteur. Les modèles proposés dans ce chapitre s'inscrivent donc dans la couche pilotage (cf. Figure 1.11 du Chapitre 1). En effet, Le chapitre précédent a pointé les sources d'incertitude sur des critères majeurs comme étant les points à discuter en priorité dans le débat, ici il s'agit d'étudier les mécanismes qui font que les experts seront plus ou moins enclins à entendre des arguments qui vont à l'encontre de leurs croyances ou de leur décision.

Ce chapitre tente également de faire le lien entre différents travaux portant sur la simulation de débats en analyse multicritère, la négociation argumentée et l'influence dans un réseau social, qui apporte chacun, des points de vue parcellaires sur la modélisation du débat. Nous n'avons pas la prétention de produire un modèle complet ou de compléter les modèles existants, mais simplement de proposer des connections entre ces différentes approches (Imoussaten, Montmain and Rigaud, 2009a) (Imoussaten et al., 2011). Cela place ce chapitre à la croisée de quatre grandes approches touchant à la décision que sont la théorie des jeux,

l'intelligence artificielle, la décision multicritère et la cybernétique. La théorie des jeux fournit un modèle des influences sociales au sein d'un groupe d'acteurs. L'intelligence artificielle, pour sa part, fournit un modèle pour la révision des connaissances quand un argument est échangé dans le groupe. La décision multicritère fournit les modèles pour agréger préférences et croyances. Enfin, les équations d'état qui modélisent le changement de conviction des acteurs au cours du débat s'inscrivent clairement dans une interprétation cybernétique du processus de décision. Le point de départ de nos travaux considère le débat d'experts comme un processus dynamique que l'on cherche à analyser et contrôler. Cette dynamique dépend entre autres de la stratégie d'argumentation des acteurs et de l'ordre dans lequel ceux-ci vont intervenir.

Les mécanismes de gestion d'incertitudes, d'argumentation et la formalisation de phénomènes d'influence sociale dans le débat que nous proposons dans ce chapitre ont pour objet de limiter les erreurs d'évaluation dans le processus de décision. L'orchestration du débat, le contrôle des phénomènes d'influence se donnent pour objectif de réduire les erreurs de coordination et d'intégration (cf. section 3.2 du Chapitre 1).

Le chapitre est organisé de la façon suivante. Dans la section 2, des rappels sur les modèles de l'intelligence artificielle, de la théorie des jeux ou encore de l'analyse multicritère, sur lesquels se fondent nos modèles, sont présentés sans avoir la prétention d'être exhaustifs. Il s'agit des notions d'influence dans un réseau social, de négociation argumentée, de dynamique et de contrôle du débat.

Dans notre approche, le contrôle de la dynamique du débat utilise l'influence qu'un acteur peut avoir dans un réseau social à travers le concept de pouvoir décisionnel (Grabisch and Rusinowska, 2010). Ce dernier est fonction de la probabilité d'inclinaison pour une option plutôt qu'une autre à un temps donné. Deux méthodes sont proposées pour le calcul de cette probabilité. La première méthode est l'objet de la section 3 et est basée sur la notion de l'utilité. La seconde méthode qui est discutée dans la section 4 est basée sur les équations d'état du changement de conviction. Une conclusion est présentée en section 5.

2. Rappel sur les notions liées à la modélisation d'un débat

Un premier modèle de simulation théorique de débat relevant du cadre de la décision multicritère a été proposé dans (Rico et al., 2004) mais sans représentation explicite de la dynamique de délibération et sans justification sémantique. Les modèles issus de la théorie de l'argumentation de Dung sont aussi des outils qui cherchent à modéliser des processus de délibération argumentée (Amgoud and Prade, 2009). Il s'agit là essentiellement de modèles cognitifs et normatifs qui ne se prêtent pas facilement à la simulation de systèmes de décision complexes. Les notions sous-jacentes dans ces modèles sont les notions d'influence, de dynamique et de contrôle. Nous essayons dans notre approche de les rendre plus explicites. La dynamique d'un débat peut être modélisée par les équations d'état de l'évolution de la

conviction (Rico et al., 2004) ou encore avec la théorie de l'argumentation (Amgoud and Prade, 2009).

2.1 La notion d'influence dans un réseau social

Il est commun de constater que durant une phase de délibération, certains acteurs vont changer leur opinion initiale. Les raisons de ce changement, en supposant que ce n'est pas un événement aléatoire, peuvent être de différents ordres. Une des raisons les plus naturelles, vient de la versatilité de certains agents qui sont influencés par les arguments d'un agent ou d'une coalition d'agents. Ils peuvent aussi se sentir plus ou moins obligés, de suivre l'avis de cet agent ou coalition pour des raisons hiérarchiques, politiques voire plus obscures. Ces agents peuvent au contraire agir en réaction à un agent ou une coalition, en suivant systématiquement l'opinion contraire. Le terme générique d'« influence » est utilisé ici pour désigner tous ces types de phénomènes de changement d'opinions conformément à (Grabisch and Rusinowska, 2009b).

2.1.1 Pouvoir décisionnel d'un acteur (Grabisch and Rusinowska, 2009)

Différents modèles ont été introduits en théorie des jeux afin de représenter l'influence dans les réseaux sociaux. Nous nous intéressons ici plus précisément à l'étude d'influence basée sur l'indice de pouvoir décisionnel de Hoede-Bakker (Hoede and Bakker, 1982). Celui-ci permet de calculer le pouvoir décisionnel global d'un acteur dans un réseau social. Cet indice a été généralisé par les travaux de Rusinowska et De Swart (Rusinowska and De Swart, 2006). Une autre approche du calcul du pouvoir décisionnel est proposée par Grabisch et Rusinowska (Grabisch and Rusinowska, 2010) (Grabisch and Rusinowska, 2009). Les raisons de l'existence de tels phénomènes d'influence, à savoir, pourquoi un individu change sa décision, relève davantage de considérations psychologiques et sont hors du champ des études proposées par Grabisch et Rusinowska (Grabisch and Rusinowska, 2009b).

Nous considérons que le débat porte sur le choix entre deux options, notées ± 1 .

Le réseau social considéré est composé d'un groupe de n acteurs $\{a_1, \dots, a_n\}$ noté $N = \{1, \dots, n\}$ pour simplifier. Chaque acteur a une inclinaison a priori à opter pour $+1$ ou -1 . Un vecteur d'inclinaisons, noté i , est composé des valeurs $+1$ et -1 : la $j^{\text{ème}}$ composante de i , est notée $i_j \in \{-1, +1\}$, elle représente l'inclinaison de l'acteur a_j . Soit $I = \{-1, +1\}^n$ l'ensemble de tous les vecteurs d'inclinaisons possibles.

Dans ce modèle d'influence, l'hypothèse de base est que chaque acteur a une inclinaison a priori qui, sous l'influence des autres acteurs, peut être différente de sa décision finale. En d'autres termes, chaque vecteur d'inclinaisons $i \in I$ est transformé en un vecteur de décisions Bi par une fonction, notée B , qui modélise l'influence dans le réseau social. La j -ème coordonnée de Bi est exprimée par $(Bi)_j, j \in \{1, \dots, n\}$ et représente la décision de l'acteur a_j . Ensuite, à chaque vecteur de décisions b est associée une décision collective du groupe

$gd(b) \in \{-1, +1\}$ par une fonction $gd : I \rightarrow \{-1, +1\}$. La fonction gd est appelée *fonction de décision de groupe* et modélise la décision du collectif d'acteurs (une majorité par exemple).

Une *fonction d'influence* B peut correspondre à un comportement collectif commun. Par exemple, dans (Grabisch and Rusinowska, 2010) une fonction d'influence majorité, notée $Maj^{[t]}$ et paramétrée par un réel t , est introduite. Plus précisément, pour un vecteur d'inclinaisons $i \in I$ donné :

$$Maj^{[t]}(i) = \begin{cases} 1_N & \text{si } [i^+] \geq t \\ -1_N & \text{si } [i^+] < t \end{cases} \quad (3.1)$$

où $[i^+] = \{j \in N / i_j = +1\}$ et 1_N (respectivement -1_N) est le vecteur des $+1$ (respectivement des -1).

Un autre exemple d'une fonction d'influence peut être la fonction d'effet de masse psychologique, initialement introduite dans (Grabisch and Rusinowska, 2010). Plus précisément, soit l'ensemble $i^\varepsilon = \{k \in N / i_k = \varepsilon\}$, B est telle que : $\forall i \in I$, si $|i^\varepsilon| > t$ alors $i^\varepsilon \subseteq (Bi)^\varepsilon$ où $t \in [1, n]$ et $\varepsilon \in \{-1, +1\}$.

La définition de l'indice du pouvoir décisionnel (l'indice de Hoede-Bakker, noté HB_{a_j}) proposée dans (Hoede and Bakker, 1982), où seulement la réussite par rapport à l'option $+1$ est considérée, a été généralisée par Rusinowska et De Swart (Rusinowska and De Swart, 2006) en étudiant la réussite pour les deux options $+1$ et -1 .

Définition 3.1 : Soient une fonction d'influence B et une fonction de décision de groupe gd , l'indice de pouvoir décisionnel généralisé d'un acteur $a_j \in N$, noté, GHB_{a_j} est défini par :

$$GHB_{a_j}(B, gd) = \frac{1}{2^n} \left(\sum_{\{i/i_j=+1\}} gd(Bi) - \sum_{\{i/i_j=-1\}} gd(Bi) \right) \quad (3.2)$$

Le principal inconvénient de l'indice de Hoede-Bakker et de sa généralisation est qu'il masque le rôle effectif de l'influence. En effet, il analyse la décision finale d'un acteur en termes de succès ou d'échec selon que la décision du groupe coïncide ou non avec l'inclinaison première de l'acteur et non avec sa décision finale. Partant de cette idée, Grabisch et Rusinowska (Grabisch and Rusinowska, 2010) ont proposé de distinguer la fonction d'influence de la fonction de décision de groupe pour formuler un nouvel indice de pouvoir décisionnel qui se base cette fois sur la concordance entre la décision du groupe et la décision de l'acteur. L'un n'est pas mieux que l'autre : ce sont deux points de vue différents de ce que représente un succès pour un individu donné dans un choix collectif. En plus, ce nouvel indice de pouvoir décisionnel permet d'affecter aux vecteurs d'inclinaisons des probabilités différentes (toutes les configurations d'inclinaisons ne sont pas également

probables). Plus précisément, notons $p : I \rightarrow [0,1]$ une distribution de probabilité sur I , où $p(i)$ est la probabilité d'occurrence du vecteur d'inclinaisons i . L'influence est modélisée par une fonction B et la décision de groupe par une fonction gd . Notons $p_B = P \circ B^{-1}$, la probabilité des vecteurs de décision.

Enfin, introduisons la notation b^{-k} suivante, pour un vecteur de décision $b \in I$ et un acteur

$$a_k, k \in N : \forall j \in N, b_j^{-k} = \begin{cases} b_j & \text{si } j \neq k \\ -b_j & \text{si } j = k \end{cases}.$$

Définition 3.2 : L'indice de pouvoir décisionnel modifié d'un acteur $a_k, k \in N$, noté ϕ_{a_k} est défini par :

$$\phi_{a_k}(B, gd, p) = \sum_{\{i/(Bi)_k=+1\}} p(i).gd(Bi) - \sum_{\{i/(Bi)_k=-1\}} p(i).gd(Bi) \quad (3.3)$$

Pour conclure sur les indices rappelés dans cette section, pour chaque acteur $a_j, j \in N$ les concepts de succès et d'échec sont rappelés :

Le succès d'un acteur $a_k, k \in N$ est défini par :

$$SUC_{a_k}(gd, p_B) = \sum_{\{b \in I / b_k = gd(b)\}} p_B(b) \quad (3.4)$$

Il correspond à la somme des probabilités des événements où la décision de l'acteur coïncide avec la décision du groupe.

L'échec d'un acteur $a_k, k \in N$ est défini par :

$$FAIL_{a_k}(gd, p_B) = \sum_{\{b \in I / b_k = -gd(b)\}} p_B(b) \quad (3.5)$$

2.1.2 Capacité d'un acteur dans un modèle de débat (Rico et al., 2004)

En décision multicritère, des modèles ont aussi été introduits afin de représenter l'influence dans un collectif d'acteurs. Dans (Rico et al., 2004), les auteurs introduisent une modélisation de l'influence différente de celle de (Grabisch and Rusinowska, 2010). En effet, l'influence qu'un acteur peut avoir sur les autres acteurs est modélisée par une capacité sur les sous ensembles de N . Notons X l'ensemble des parties de N ($X = 2^N$).

Définition 3.3 : une capacité normalisée ν sur X est une fonction $\nu : X \rightarrow [0,1]$ telle que $\nu(\emptyset) = 0$, $\nu(N) = 1$ et $\forall A, A' \in X, A \subseteq A' \Rightarrow \nu(A) \leq \nu(A')$.

Pour faire le lien avec le chapitre précédent où les définitions des mesures de possibilité et de nécessité ont été rappelées, une capacité normalisée est liée à ces deux notions de la façon suivante :

- Une mesure de possibilité Π est une capacité normalisée telle que :
 $\forall A, B \in X \Rightarrow \Pi(A \cup B) = \Pi(A) \vee \Pi(B)$.
- Une mesure de nécessité N est une capacité normalisée telle que :
 $\forall A, B \in X \Rightarrow N(A \cap B) = N(A) \wedge N(B)$

La capacité d'une coalition d'acteurs $A \in X$ représente l'importance de cette coalition dans le collectif N . Pour deux acteurs a_l et a_s ($l, s \in N$), $\nu(\{a_l\}) + \nu(\{a_s\}) < \nu(\{a_l, a_s\})$ (respectivement $\nu(\{a_l\}) + \nu(\{a_s\}) > \nu(\{a_l, a_s\})$) signifie qu'il existe une synergie positive (respectivement négative) entre les deux acteurs. Cette interprétation de l'influence est à la base du mécanisme de révision des préférences d'un acteur après l'intervention d'un autre acteur dans le débat.

Pour caractériser l'influence entre deux acteurs a_l et a_s , une autre capacité normalisée ν_{a_l, a_s} est introduite dans (Rico et al., 2004) sur la paire composée par ces deux acteurs à partir de la capacité normalisée ν . Plus précisément, la capacité normalisée ν_{a_l, a_s} est définie de la manière suivante :

$$\forall A \subseteq \{a_l, a_s\}, \nu_{a_l, a_s}(A) = \frac{\nu(A)}{\nu(\{a_l, a_s\})} \quad (3.6)$$

2.2 La notion de dynamique dans un débat

L'une des questions soulevées par Grabisch et Rusinowska en conclusion de (Grabisch and Rusinowska, 2010) est l'introduction d'aspects dynamiques dans le modèle d'influence que cet article propose. Les auteurs de (Grabisch and Rusinowska, 2010) traitent en effet de l'influence mutuelle des acteurs pour des décisions qui se jouent sur un *tour*, mais en réalité un processus de décision est généralement un processus itératif où l'influence continue de s'exercer jusqu'à ce qu'une décision soit prise par le groupe. Selon un point de vue proche des modèles de l'automatique (matrice de commandabilité), les auteurs envisagent d'aborder cette extension en étudiant les puissances de la fonction d'influence B pour établir des conditions de convergence et étudier les pouvoirs décisionnels correspondants.

La modélisation de la dynamique d'un débat a été traitée sous forme de la révision de la conviction d'un acteur à l'aide d'équations de récurrence (Rico et al., 2004) et sous forme de révision des connaissances (changement d'utilité) à l'aide de l'argumentation (Amgoud, Belabbès and Prade, 2004) ; (Belabbès, 2007) ; (Amgoud and Prade, 2009) ou encore en utilisant la révision de croyances dans les travaux (Benferhat et al., 2002a) ; (Benferhat et al., 2009) ; (Benferhat et al., 2002b) ; (Dubois and Prade, 1997) ; (Dubois, Moral and Prade, 1998). Les sections suivantes en font un rappel synthétique.

2.2.1 Révision des convictions des acteurs

La question de la dynamique de l'évolution des préférences des acteurs au cours d'un débat a déjà été soulevée (Rico et al., 2004). Dans cette approche, le concept utilisé en décision multicritère (Grabisch and Perny, 1999) est utilisé pour représenter les relations d'influence entre les acteurs d'un débat pour trancher entre deux alternatives.

Un des apports principaux de cette contribution, à notre avis, porte sur le modèle de révision de la *conviction* et de la préférence des acteurs au cours du débat qui conduit à un consensus. En effet, un acteur a_j ($j \in N$), est représenté par son profil celui-ci inclut sa préférence, son importance (*i.e.* sa capacité $\nu(\{a_j\})$) et l'intensité de sa préférence nommée *conviction* (notée $c_{a_j} \in [0,1]$). Au cours du débat, chaque acteur peut prendre la parole pour annoncer sa préférence. En fonction de son importance (influence) dans le collectif, les autres acteurs vont réviser leur opinion. Si la conviction d'un acteur envers sa préférence initiale devient trop faible, il peut changer de préférence. La nouvelle conviction de l'acteur est fonction de son ancienne conviction et de la conviction de l'acteur qui a apporté un argument au débat pour défendre sa propre préférence. Plus précisément, la dynamique du débat qui se matérialise par le changement de conviction est modélisée en utilisant une intégrale symétrique de Choquet nommée aussi intégrale de Sipos. L'intégrale de Sipos est définie comme suit :

Définition 3.4 : Soient $a = (a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{R}^n$ et $(.)$ une permutation sur $\{1, \dots, n\}$ telle que $a_{(1)} \leq \dots \leq a_{(p)} \leq 0 \leq a_{(p+1)} \leq \dots \leq a_{(n)}$ et ψ une capacité normalisée sur $2^{\{1, \dots, n\}}$. L'intégrale symétrique de Sipos de a par rapport à ψ , noté $\tilde{C}_\psi(a)$, est définie par :

$$\begin{aligned} \tilde{C}_\psi(a) = & \sum_{i=1}^{p-1} \left[a_{(i)} - a_{(i+1)} \right] \psi(\{(1), \dots, (i)\}) + a_{(p)} \psi(\{(i), \dots, (p)\}) \\ & + a_{(p+1)} \psi(\{(p+1), \dots, (n)\}) + \sum_{i=p+2}^n \left[a_{(i)} - a_{(i-1)} \right] \psi(\{(i), \dots, (n)\}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Dans (Rico et al., 2004), l'intégrale de Sipos \tilde{C}_ψ est définie sur le couple d'acteurs a_l (l'acteur qui écoute) et a_s (l'acteur qui énonce un point de vue) ($l, s \in N$), qui sont formellement isolés du reste du groupe. En outre, la capacité normalisée utilisée est la capacité $\psi := \nu_{a_l, a_s}$ définie sur $\{a_l, a_s\}$ comme dans la formule (3.6).

Le changement de convictions proposé dans (Rico et al., 2004) peut alors être résumé de la manière suivante :

- Si les agents a_l et a_s ont la même préférence,
 - ❖ lorsque $c_{a_s} > c_{a_l}$ la nouvelle conviction de a_l notée $\tilde{C}_{\nu_{a_l, a_s}}(c_{a_s}, c_{a_l})$ est :

$$\tilde{C}_{v_{a_l, a_s}}(c_{a_s}, c_{a_l}) = c_{a_l} + (c_{a_s} - c_{a_l}) \cdot v_{a_l, a_s}(a_s) \quad (3.8)$$

❖ lorsque $c_{a_l} > c_{a_s}$ la nouvelle conviction de a_l notée $\tilde{C}_{v_{a_l, a_s}}(c_{a_s}, c_{a_l})$ est :

$$\tilde{C}_{v_{a_l, a_s}}(c_{a_s}, c_{a_l}) = c_{a_s} + (c_{a_l} - c_{a_s}) \cdot v_{a_l, a_s}(a_l) \quad (3.9)$$

- Si les agents a_l et a_s n'ont pas la même préférence, la nouvelle conviction est :

$$\tilde{C}_{v_{a_l, a_s}}(c_{a_s}, c_{a_l}) = -c_{a_s} v_{a_l, a_s}(a_s) + c_{a_l} v_{a_l, a_s}(a_l) \quad (3.10)$$

La principale critique de cette modélisation est son manque de justification sémantique d'une part, par rapport à la capacité construite (l'influence est réduite à une importance normalisée), d'autre part le concept de conviction n'est pas introduit formellement et les équations de révision sont écrites dans un formalisme qui ne fait pas apparaître explicitement le temps (l'aspect dynamique). De notre point de vue, leur modèle, implicitement, consiste à établir l'équation d'état non linéaire de la conviction d'un acteur a_l après l'intervention d'un acteur a_s sous la forme d'une équation aux différences de type $c_l(k+1) = F(\pm c_l(k), \pm c_s(k))$, puis en fonction de la conviction à $k+1$ à déterminer l'évolution de sa préférence. Nous proposerons une extension de ce modèle dans la dernière section de ce chapitre.

Alors que le modèle proposé dans (Rico et al., 2004) fait appel explicitement à la notion d'intervention, il peut paraître étonnant que la notion d'arguments en soit absente : la dynamique du débat y est indépendante de la pertinence des arguments échangés par les acteurs, et ne repose que sur leur seule influence sociale. Une évolution possible de ce modèle serait de combiner la force d'un argument avancé par un acteur avec son influence sociale. L'évolution et la révision des préférences d'un acteur doivent alors intégrer les mécanismes d'un processus de négociation argumentée. Les modèles nécessaires ne relèvent plus de la théorie des jeux, mais de l'intelligence artificielle. Cette extension fait l'objet de la section suivante.

2.2.2 Argumentation et révision des connaissances

Au cours de la délibération, nous avons vu que les acteurs peuvent changer d'avis et abandonner leur inclinaison initiale en faveur d'une alternative et en choisir une autre dans une dynamique de groupe qui obéit à des phénomènes d'influence sociale entre les acteurs (Grabisch and Rusinowska, 2010) ; (Rico et al., 2004) mais aussi aux stratégies d'argumentation de ces acteurs (Amgoud, Belabbès and Prade, 2004) ; (Belabbès, 2007) ; (Amgoud and Prade, 2009). L'argumentation est un moyen de négociation entre les acteurs qui peut s'avérer très efficace. La modélisation de la négociation argumentée consiste alors à gérer les échanges d'arguments entre les acteurs et à mettre à jour leurs connaissances en fonction d'informations nouvelles.

Un dialogue de négociation émerge à partir d'une situation de conflit d'intérêts entre deux acteurs individualistes ayant un désir de coopérer (Belabbès, 2007). L'exemple souvent donné dans les systèmes multi agents est le conflit sur le partage de ressources *rare*s. Un acteur souhaite réaliser une certaine action, et il s'aperçoit que pour ce faire, il a besoin d'utiliser une ressource détenue par un autre acteur. Le conflit apparaît lorsque le second acteur a lui-même besoin de la ressource pour réaliser une action en accord avec ses propres préférences. Les acteurs échangent donc des offres et des contre-offres, soutenues par des arguments, pour trouver un accord sur le partage de la ressource. Le but personnel de chaque acteur est de maximiser sa propre part de la division de la ressource, tout en respectant l'objectif de la négociation qui est de parvenir à un compromis acceptable pour tous les acteurs de la décision. Les agents sont supposés prêts à faire des concessions sur certains de leurs buts individuels pour atteindre cet accord (Belabbès, 2007).

La négociation a été largement étudiée par la théorie des jeux. Selon cette perspective, l'utilité est le seul paramètre considéré par les acteurs pour négocier le partage d'un gain (Giroud, 2000) (Owen, 1995) (Moulin, 1995) (Labreuche, 2007). La théorie des jeux réduit la négociation à l'échange d'offres et de contre-offres, jusqu'à trouver celle qui satisfasse au mieux les acteurs (reste à s'entendre sur le sens de « au mieux » (Labreuche, 2007)). En dehors des hypothèses de modélisation pratiquées dans ces approches (les acteurs ont une connaissance parfaite et des préférences explicites précises qui restent les mêmes tout au long de la négociation), ces approches ne permettent malheureusement pas d'échanger des informations sur les offres ni de donner les raisons d'un rejet ou d'une acceptation. La justification des choix d'un acteur vis-à-vis des autres acteurs devrait améliorer efficacement la recherche mutuelle d'un compromis (Belabbès, 2007).

a. La négociation argumentée

Amgoud et Prade se sont intéressés à l'intégration de l'argumentation dans la négociation (Amgoud, Belabbès and Prade, 2004) ; (Belabbès, 2007) ; (Amgoud and Prade, 2009). Ils expliquent comment l'argumentation peut assister les acteurs dans leur raisonnement inférentiel et décisionnel à partir des informations dont ils disposent pour la résolution de conflits. Selon leur modèle inférentiel, un argument se compose de prémisses qui apportent une justification, une explication ou une preuve en faveur de la conclusion. La construction d'arguments se fait depuis une base de connaissances en fonction des croyances et des objectifs de l'acteur.

Plus précisément, les auteurs de (Belabbès, 2007) et (Amgoud and Prade, 2009) proposent un cadre d'argumentation pour définir un pré-ordre sur les alternatives en concurrence à partir de deux types d'arguments : les arguments épistémiques se rapportant à des croyances, et les arguments de décision se rapportant à des alternatives. Dans la suite, un rappel des notions liées à l'argumentation proposées dans (Belabbès, 2007) et (Amgoud and Prade, 2009) est donné.

Dans (Belabbès, 2007), l'auteur montre que seulement les arguments de décision peuvent être retenus pour établir un préordre sur les alternatives et que la partie inférentielle de

l'argumentation peut être traitée séparément sans influence sur l'acceptabilité des arguments de décision. L'acceptabilité des arguments est basée sur le cadre proposé par Dung (Dung, 1995) : un argument est acceptable pour un agent rationnel s'il peut le défendre contre tout conflit, l'ensemble de tous les arguments acceptés par cet agent est un ensemble d'arguments qui se défendent mutuellement contre tout conflit. La théorie de l'argumentation de Dung est traitée plus en détail dans le Chapitre 5.

La manipulation des arguments des agents passe par une représentation de leurs connaissances et de leurs préférences i.e., le *mental* d'un agent. Une représentation possibiliste du mental d'un agent au cours de la négociation peut être présentée (Belabbès, 2007) par un triplet, noté $\langle D, K, G \rangle$, où :

- D est l'ensemble des décisions réalisables commun à tous les agents. Il s'agit des conjonctions ou disjonctions des décisions élémentaires. Il représente l'ensemble des offres que les agents sont susceptibles d'échanger dans une négociation ;
- K contient les croyances ou connaissances d'un agent, il n'est pas nécessairement consistant ;
- G est la base des buts de l'agent. Elle contient ce que l'agent souhaite réaliser ce qui revient à dire pour chaque but de G , l'agent recherche les situations où ce but est réalisé.

Pour mettre en valeur les connaissances les plus sûres et les buts prioritaires d'un agent, les bases K et G sont stratifiées :

- La base K est partitionnée et stratifiée en plusieurs bases K_0, \dots, K_n ($K = \bigcup_{l=0,n} K_l$) telles que les formules dans K_l ont le même degré de certitude et sont plus certaines que celles dans $K_{l'}$, où $l' < l$. Cette base peut être inconsistante, i.e., contenir des connaissances incohérentes. On note : $U = \{0, 1, \dots, n\}$.
- La base G est aussi partitionnée et stratifiée en G_0, \dots, G_m ($G = \bigcup_{t=0,m} G_t$) telles que les buts dans G_t ont la même importance et sont plus importants que ceux de $G_{t'}$, où $t' < t$. Cette base est supposée consistante, donc un agent n'est pas autorisé à avoir des buts contradictoires. On note $V = \{0, 1, \dots, m\}$.

Les bases de croyances et de buts stratifiées peuvent être aussi représentées sous forme de bases logiques possibilistes (Dubois and Prade, 2001) (Dubois, Lang and Prade, 1994). Ainsi les bases K et G d'un agent peuvent être représentées de la façon suivante : $\mathcal{B} = \{(b_j, \rho_j), 0 \leq j \leq t\}$ où la paire (b_j, ρ_j) signifie que la croyance ' b_j est vraie' est certaine ou est prioritaire au moins à hauteur de ρ_j .

La base \mathcal{B} est associée à une distribution de possibilité notée $\pi_{\mathcal{B}}$ ($\pi_{\mathcal{B}} : \Omega \rightarrow W$) où Ω est un ensemble d'interprétations et $W = U$ ou $W = V$, de la façon suivante (Dubois, Lang and Prade, 1994) :

$$\pi_{\mathcal{B}}(\omega) = \min_{1 \leq j \leq p} \max(\mathcal{G}_{\omega}(b_j), \text{inv}(\rho_j)) \quad (3.11)$$

$$\text{où : } \mathcal{G}_{\omega}(b_j) = \begin{cases} \rho_i & \text{si } \omega \text{ satisfait } b_j \\ 0 & \text{si } \omega \text{ falsifie } b_j \end{cases}$$

et $\text{inv} : W \rightarrow W$ est une application qui renverse l'ordre sur W telle que si $\text{inv}(0) = \rho_i$ et $\text{inv}(\rho_i) = 0$.

A partir du triplet $\langle D, K, G \rangle$, des arguments sont construits en faveur ou contre une alternative. Un argument arg d'un agent est représenté par un ensemble de connaissances consistantes $S \subseteq K$, une alternative $d \in D$ et un but $g \in G$ qui est satisfait ou violé quand l'alternative d est choisie : $\text{arg} := \langle S, d, g \rangle$.

Définition 3.5 : Arguments PRO - Un argument en faveur d'une alternative d est un tuple $\text{arg} := \langle S, d, g \rangle$ où $S \cup \{d\}$ est consistant (*i.e.*, d est applicable dans le contexte S) et $S \cup \{d\} \mapsto g$ (satisfaction garantie d'un but), S est le support de l'argument arg .

Définition 3.6 : Arguments CON :

- Un argument fort contre une alternative d est un tuple $\text{arg} := \langle S, d, g \rangle$ où $S \cup \{d\}$ est consistant (*i.e.*, d est applicable dans le contexte S) et $S \cup \{d\} \mapsto \neg g$ (violation garantie d'un but), S est le support de l'argument arg ;
- Un argument faible contre une alternative d est un tuple $\text{arg} := \langle S, d, g \rangle$ où $S \cup \{d\}$ est consistant (*i.e.*, d est applicable dans le contexte S) et $S \cup \{d\} \not\mapsto g$ (absence d'une bonne conséquence) S est le support de l'argument arg .

Dans le cas d'un débat, un agent a besoin de définir un ordre de préférence sur ses arguments pour savoir lequel avancer à un instant donné de la négociation argumentée. Dans (Belabbès, 2007) et (Amgoud and Prade, 2009), la notion de force d'un argument est introduite à cet effet. Elle est basée sur les notions de niveau et de poids :

- $\text{Niveau}(\text{arg})$, désigne le niveau de certitude de arg et est le degré de certitude de la connaissance la moins sûre que arg utilise :

$$\text{Niveau}(\text{arg}) = \begin{cases} \min\{l / (1 \leq l \leq n) \text{ tel que } S_l = S \cap K_l\} ; \\ n \text{ si } S = \emptyset \end{cases}$$

- $Poids(arg)$, désigne le poids (ou degré de satisfaction) de arg , c'est le degré d'importance du but G : $Poids(arg) = \alpha$ si $g \in G_\alpha$.

Définition 3.7 : force d'un Argument de décision - la force d'un argument $arg := \langle S \subseteq K, d \in D, g \in G \rangle$ d'un agent, notée $F(arg) \in \mathbb{R}^2$, est définie par : $F(arg) := (Niveau(arg), Poids(arg))$.

Une préférence \succ_f entre les arguments peut être définie en utilisant la force d'un argument (Amgoud and Prade, 2009), de la façon suivante (ceci en considérant la commensurabilité des échelles $U = V$) :

$$arg \succ_f arg' \text{ssi } \min(niveau(arg), Poids(arg)) > \min(niveau(arg'), Poids(arg')) \quad (3.12)$$

Les agents peuvent utiliser plusieurs stratégie pour la sélection de leur argument. Dans (Belabbès, 2007), par exemple, il est-supposé que l'agent adopte une stratégie coopérative.

b. Utilité qualitative pessimiste

Dans le cas de l'aide à la décision sous incertitude (Amgoud, Belabbès and Prade, 2004) ; (Belabbès, 2007) ; (Amgoud and Prade, 2009), les auteurs considèrent que, un agent est capable d'évaluer une alternative $d \in D$ en fonction de ses croyances dans K et de ses buts dans G . Plusieurs critères ont été introduits à cet effet. Nous étudions plus particulièrement le cas du critère pessimiste (Dubois and Prade, 1995) ; (Dubois, Prade and Sabbadin, 2001) (utilité pessimiste, notée E_* cf. la formule (3.13)). Ce critère a été choisi pour la « prudence » qu'il garantit aux agents par rapport à leur évaluation. En effet $E_*(d)$ est petit s'il existe une conséquence possible de d qui est à la fois très plausible et mauvaise du point de vue des préférences (attitude d'aversion au risque d'où l'intitulé d'utilité pessimiste).

Soit K_d la base de connaissances construite à partir de la base K à laquelle la décision d est ajoutée à la strate K_n , et qui représente la description de ce qui est connu sur le monde lorsque d est appliquée. Soient π_d la distribution de possibilité associée à K_d et μ la distribution de possibilité associée à G définies à partir de la formule (3.11), toutes deux définies d'un ensemble d'interprétations Ω vers U (on suppose que $V = U$), une utilité qualitative pessimiste de d peut être définie par :

$$E_*(d) = \min_{\omega \in \Omega} \max(\mu(\omega), inv(\pi_d(\omega))) \quad (3.13)$$

$inv: U \rightarrow U$ est une application qui renverse l'ordre sur U telle que $inv(0) = n$ et $inv(n) = 0$.

c. La révision des connaissances

L'évolution dynamique par révision dans le cadre possibiliste à l'arrivée d'une nouvelle information a suscité un intérêt considérable en représentation des connaissances (Benferhat et al., 2002a) ; (Benferhat et al., 2002b) ; (Benferhat et al., 2009) ; (Dubois and Prade, 1997) ; (Dubois, Moral and Prade, 1998).

Dans la logique possibiliste, la révision des croyances d'un agent après l'arrivée d'une nouvelle information notée (p, ρ) (*i.e.*, ρ est le degré de certitude de p) consiste à obtenir une nouvelle distribution de possibiliste $\pi'_{\mathcal{K}}$ à partir de la distribution $\pi_{\mathcal{K}}$ (qui représente la base de connaissance K dans la formule (3.11)) et p . Cette distribution doit satisfaire au moins les deux conditions suivantes (Benferhat et al., 2002a) : (i) $N_{\pi_{\mathcal{K}}}(p) > 0$ (*i.e.*, p est quelque peu acceptée) et (ii) $\pi'_{\mathcal{K}}$ est normalisée (*i.e.*, le nouvel état de croyances est cohérent). Plusieurs propositions de révision ont été suggérées : dans (Dubois, Moral and Prade, 1998), les auteurs reprennent les trois formes basiques de la dynamique des croyances décrites par Gardenfors (Gardenfors and Rott, 1995) : expansion, contraction et révision pour les représenter dans le cas possibiliste, citons encore la révision à base de conditionnement (Benferhat et al., 2002a) (Dubois, Moral and Prade, 1998) basée sur le conditionnement possibiliste (le dispositif de conditionnement similaire à celui des probabilités (Dubois, Moral and Prade, 1998)). Nous allons présenter cette dernière révision en détail.

Dans le cas où la nouvelle information est sûre $\rho = n$, la révision consiste à considérer toute interprétation contredisant la nouvelle information comme impossible et $N_{\pi_{\mathcal{K}}}(p) = 1$. Comme nous sommes dans un cadre ordinal, le conditionnement rappelé est basé sur l'opérateur *min* :

$$\pi'_{\mathcal{K}}(\omega) := \pi_{\mathcal{K}}^{\min}(\omega / p) = \begin{cases} n & \text{si } \pi_{\mathcal{K}}(\omega) = \Pi_{\mathcal{K}}(p) \text{ et } \omega \text{ satisfait } p \\ \pi_{\mathcal{K}}(\omega) & \text{si } \pi_{\mathcal{K}}(\omega) < \Pi_{\mathcal{K}}(p) \text{ et } \omega \text{ satisfait } p \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.14)$$

où $\Pi_{\mathcal{K}}$ est la mesure de possibilité associée à la distribution de possibilité $\pi_{\mathcal{K}}$.

Dans le cas où l'information n'est pas sûre, la condition (i) devient $N_{\pi_{\mathcal{K}}}(p) = a$ (Benferhat et al., 2002b). Les auteurs de (Benferhat et al., 2002b) proposent une écriture des équations (3.14) dans le cas d'ajout d'une nouvelle information incertaine :

- Conditionnement pour le cas où ω satisfait p :

$$\pi'_{\mathcal{K}}(\omega) := \pi_{\mathcal{K}}^{\min}(\omega / p) = \begin{cases} n & \text{si } \pi_{\mathcal{K}}(\omega) = \Pi_{\mathcal{K}}(p) \\ \pi_{\mathcal{K}}(\omega) & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.15)$$

- Conditionnement pour le cas où ω satisfait $\neg p$:

$$\pi'_{\mathcal{K}}(\omega) := \pi_{\mathcal{K}}^{\min}(\omega / p) = \begin{cases} n - \rho & \text{si } (\pi_{\mathcal{K}}(\omega) = \Pi_{\mathcal{K}}(-p) \text{ ou } \pi_{\mathcal{K}}(\omega) > 1 - N_{\pi_{\mathcal{K}}}^{\cdot}(p)) \\ \pi_{\mathcal{K}}(\omega) & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.16)$$

La révision à base de conditionnement est le processus que nous utiliserons pour notre modélisation dynamique du débat dans la section 3 de ce chapitre. Elle correspond, en effet au cas général où les agents orateurs proposent des arguments fondés sur des connaissances non nécessairement certaines que les agents auditeurs doivent intégrer dans leurs bases de connaissances respectives.

2.3 La notion de contrôle d'un débat

Dans une délibération anarchique (non pilotée) (voir Figure 3.1) les acteurs échangent des informations, ce qui les amène à réviser leur opinion à chaque nouvelle information produite. Le processus continue jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'informations nouvelles : les acteurs prennent alors la décision.

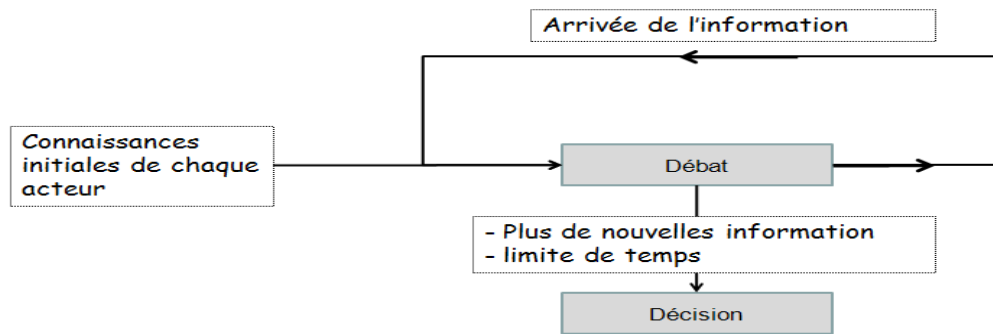


Figure 3.1 : Délibération anarchique

Il existe des cas où toute minute gagnée dans le processus est importante (le cas d'une crise par exemple), ce qui requiert un pilotage du débat efficace pour converger vers un consensus le plus vite possible lorsque cela est possible. Le pilotage du débat peut aussi faire éviter des phénomènes comme le *groupthink* où tous les acteurs ont tendance à chercher le consensus plutôt que d'appréhender de manière réaliste la situation, accélérer la convergence du débat ou encore forcer une décision.

Le raisonnement des acteurs, les protocoles d'interaction et les stratégies déterminent l'ordre dans lequel les arguments sont formulés et par conséquent définissent la dynamique du débat. Un protocole consiste essentiellement en un ensemble de règles qui gèrent le bon comportement des acteurs en interaction afin de générer des dialogues. Plusieurs paramètres définissent un protocole, en particulier le tour de parole détermine les règles selon lesquelles les acteurs prennent la parole. Plusieurs protocoles, plus ou moins rigides peuvent ainsi être définis, mais ils reposent sur des règles qui définissent la dynamique du débat a priori.

Les auteurs de (Rico et al., 2004) ont fait remarquer que si l'ordre dans lequel s'expriment les agents est arbitraire, le consensus peut être long à obtenir et différent selon l'ordre de prise de parole. Ils ont proposé, alors, un moyen d'accélérer cette convergence en désignant l'acteur le plus apte à obtenir une majorité comme l'orateur suivant. Si aucun des acteurs ne peut faire augmenter la majorité en prenant la parole, alors la parole est donnée à l'acteur qui possède le plus petit nombre de tours de parole nécessaires pour provoquer un changement de préférence chez les acteurs qui ont une préférence opposée à la sienne. Ils proposent alors un mécanisme de pilotage qui vise à modifier l'évolution de la conviction avec pour objectif de converger au plus vite vers un consensus. Au-delà de la justification du choix d'une intégrale de Sipos, le modèle de (Rico et al., 2004) paraît tout à fait pertinent à des fins de contrôle du débat parce que très proche des modèles pour la commande en automatique.

Dans les deux modèles qui vont être proposés dans les sections 3 et 4 de ce chapitre, l'idée intuitive derrière la gouvernance du débat est de faire s'exprimer l'individu susceptible de rallier le plus d'agents à son opinion. Cet individu diffère d'un tour de parole à l'autre selon l'état des convictions à cet instant. C'est pour cette raison que nous nous sommes intéressés à la notion d'influence dans un réseau social pour voir quel rôle cette grandeur pouvait jouer dans notre modèle dynamique du débat.

3. Modèle de débat basé sur l'argumentation

Le modèle de débat présenté ici (Imoussaten, Montmain and Rigaud, 2009a) (Imoussaten, Montmain and Rigaud, 2009b) propose de relier la révision d'opinions au pilotage de la dynamique de la délibération par le biais d'indices d'influence.

Dans un problème de gestion de crise, par exemple, où il est nécessaire de prendre une décision même si elle ne fait pas l'unanimité (une décision est forcément prise même si elle doit être anti démocratique), nous avons besoin de gérer l'échange d'opinions entre les acteurs de la cellule de crise et d'accélérer le processus de décision (la délibération) pour intervenir le plus vite possible afin de résoudre la crise avant une éventuelle aggravation. Dans ce sens, ce premier modèle considère la délibération comme ayant une dynamique propre déterminée par l'ordre dans lequel les arguments sont échangés. Chaque acteur a des croyances et une influence sur le groupe qui lui sont propres. Son intervention peut à tout moment faire la décision : faire apparaître un compromis qui satisfasse si possible le plus grand nombre et qui mette fin à la délibération. La décision collective est donc sensible à l'ordre dans lequel interviennent les acteurs. Nous proposons alors une gouvernance de la décision de groupe qui consiste à définir dynamiquement l'ordre d'intervention des acteurs selon l'influence qui leur est attribuée en temps réel. Le type de pilotage envisagé dans cette section n'est qu'un exemple et consiste à donner systématiquement la parole à l'acteur susceptible de rallier le plus d'acteurs à son opinion (la convergence vers un consensus n'est pas garantie pour autant).

Notre approche utilise la décomposition de la délibération en étapes conformément à certaines études en psychosociologie (Anzieu and Martin, 1982) où il est considéré que la prise de décision de groupe passe par trois grandes étapes importantes : la collecte d'informations, l'évaluation et l'influence. Nous proposons ici de traiter l'étape de la collecte d'informations par les mécanismes de l'argumentation nécessaires à la représentation et la révision des connaissances. L'étape de l'évaluation consiste à calculer la probabilité de l'inclinaison pour une option ou pour une autre pour chaque agent en se basant sur les informations collectées et les utilités associées. L'introduction de nouveaux arguments dans le débat modifie la perception de la situation pour chacun des acteurs et, par la suite, la probabilité de leur inclinaison pour une option ou pour une autre. L'indice de pouvoir décisionnel (cf. formule de la section 2.1.1), choisi ici pour modéliser l'influence, est par conséquent modifié dans le temps. Nous suggérons alors, dans l'étape de l'influence, d'utiliser l'indice de pouvoir décisionnel pour piloter le débat qui supporte la décision : cet indice est calculé après chaque échange d'arguments en fonction de la nouvelle distribution de probabilités des inclinaisons.

Nous nous intéressons ici aux décisions collectives néanmoins fréquentes où l'ensemble des options ne contient que deux éléments qui font l'objet du débat (« *Evacuer* » et « *Ne Pas Evacuer* » dans l'exemple de la gestion de crise du Chapitre 2).

Nous commençons par introduire les notations nécessaires pour le modèle présenté et ensuite nous présentons les trois étapes ci-dessus.

3.1 Notations

Nous allons adopter les notations suivantes dans cette section :

- L'ensemble des options est noté $X = \{x_1, x_2\} = \{-1, +1\}$.
- Le groupe d'agents est noté $\{a_1, \dots, a_n\}$.
- Les notations du vecteur d'inclinaisons i , la $j^{\text{ème}}$ composante de i ($i_j \in \{-1, +1\}$), la probabilité p et le pouvoir décisionnel ϕ_{a_k} de la section 2.1.1 seront maintenant associés à une variable temps ($i(t), i_j(t), p(t)$ et $\phi_{a_k}(t)$).
- La fonction d'influence sera notée B , la fonction de décision de groupe sera notée gd et l'ensemble de tous les vecteurs d'inclinaisons possibles est noté $I = \{-1, +1\}^n$.
- Pour chaque agent a_j , $K^j(t)$ est sa base de connaissance à l'instant t et G^j sa base de buts. Les bases $K^j(t)$ et G^j sont associées aux distributions de possibilité notées $\pi_{K^j(t)}$ ($\pi_{K^j(t)} : \Omega \rightarrow U_j$) et μ^j ($\mu^j : \Omega \rightarrow V_j$) où Ω est un ensemble d'interprétations, U_j et V_j sont des échelles linéairement ordonnées. Pour simplifier les notations, les degrés des strates sont supposés être les mêmes pour les deux bases $K^j(t)$ et G^j et ce, pour tous les agents. Une échelle unique finie linéairement ordonnée $U = \{0, 1, \dots, n\}$

représente ces degrés de strates où 0 et n sont respectivement les éléments inférieur et supérieur de U .

3.2 L'étape de la collecte d'informations

L'étape de la collecte d'informations nécessite deux étapes : 1) représenter les agents ; 2) réviser les connaissances des agents une fois qu'un nouvel argument est échangé dans le débat.

Un agent a_j est représenté par son mental, qui est modélisé par le triplet $\langle X, K^j(t), G^j \rangle$. Les arguments des agents sont construits à partir de ce triplet. Les arguments manipulés dans le modèle que nous proposons sont des arguments de décision (dont la prémisse est l'une des deux options) qui ne sont pas en conflit et considérés comme acceptables par rapport à l'état courant des croyances. Un argument \arg d'un agent a_j est représenté comme dans la section 2.2.2 : $\arg := \langle S \subseteq K^j(t), x \in X, g \in G^j \rangle$. Nous considérons ici que l'ensemble des connaissances S est réduit à un singleton (une seule information à la fois fait l'objet de l'intervention d'un agent), une information p de type : $p : x \rightarrow g$ (argument de décision). Ainsi s'écrit : $\arg := \langle x \rightarrow g, x \in X, g \in G^j \rangle$ où $\text{niveau}(\arg) = \rho_1$ et $\text{Poids}(\arg) = \rho_2$ ($\rho_1, \rho_2 \in U$ sont respectivement le degré de certitude de l'information " $x \rightarrow g$ " et le degré de priorité du but g). L'argument sera noté : $\arg_{a_j}(\rho_1, \rho_2)$.

La révision des connaissances est un processus qui consiste ici à rajouter un argument dans la base des agents après chaque prise de parole. Ceci revient à rajouter une information nouvelle dans la base de connaissances courante des agents comme proposé dans la section 2.2.1.

Soit $a_{s(t)}$ l'agent qui prend la parole à l'instant t . Celui-ci est supposé adopter une stratégie coopérative. Il choisit des arguments favorables à sa préférence pour la défendre ou des arguments contre la préférence opposée pour l'attaquer. L'agent $a_{s(t)}$ choisit le meilleur argument au sens de \succ_f (cf. la formule (3.12) de la section 2.2.2) dans sa base de connaissances, en faveur de sa préférence. Soit $\arg_{a_{s(t)}}(\rho_1, \rho_2)$ l'argument choisi par l'agent $a_{s(t)}$. Il doit être pris en compte dans la base de connaissances de tous les agents $(a_l)_{l \neq s(t)}$ du collectif.

La révision que nous avons choisie est une révision basée sur le conditionnement possibiliste vu que les arguments échangés entre les agents sont rarement certains. La révision à base de conditionnement permet le cas sûr et le cas incertain. Ainsi, les nouvelles distributions de possibilité $\pi_{K^l(t+1)}$ représentant les nouvelles bases $K^l(t+1)$ sont calculées de la manière suivante : $\pi_{K^l(t+1)} = \pi_{K^l(t)}^{\min}(. / x \rightarrow g)$

- avec $\pi_{K^l(t)}^{\min}$ calculée par la révision présentée dans la formule (3.14), si l'argument est sûr (le degré de certitude de l'information $x \rightarrow g$ est $\rho_l = n$) ;
- avec $\pi_{K^l(t)}^{\min}$ calculée par les révisions présentées dans les formules (3.15) et (3.16), si l'argument n'est pas sûr ($\rho_l < n$).

3.3 L'étape de l'évaluation

L'étape de l'évaluation consiste à calculer la probabilité de l'inclinaison pour une option ou pour une autre pour chaque agent en se basant sur les utilités qualitatives associées à ces options. Chaque acteur a_j est supposé évaluer les alternatives $x \in X$ à chaque instant t . Cette évaluation est représentée ici par la fonction d'utilité qualitative $E_*^j(t, x)$ comme définie dans la formule (3.13) :

$$E_*^j(t, x) = \min_{\omega \in \Omega} \max(\mu^j(\omega), \text{inv}(\pi_d^j(\omega))) \quad (3.17)$$

où π_d^j est la distribution de possibilité associée à K_d^j .

Définition 3.8 : Soit $\rho_l, \rho_{l'} \in U$. L'écart d'échelles entre ρ_l et $\rho_{l'}$ est noté $\|\rho_l - \rho_{l'}\|_{st}$ (st, pour strate) et défini comme le nombre de strates séparant ρ_l et $\rho_{l'}$ sur l'échelle U .

Lorsque l'acteur a_j a estimé l'utilité de chacune des deux alternatives, il est supposé avoir une inclinaison plus ou moins marquée pour celle dont l'utilité est maximale. L'inclinaison de l'acteur a_j pour une option ou pour une autre peut être représentée par une variable aléatoire discrète de Bernouilli notée Y où les issues de Bernouilli sont « -1 » et « +1 ». Intuitivement, il est possible de penser que l'agent a_j aura une inclinaison d'autant plus prononcée pour une option quand l'écart d'échelle $\|E_*^j(t, +1) - E_*^j(t, -1)\|_{st}$ entre les utilités des deux alternatives est grand à l'instant t , il sera noté $\Delta E^j(t)$ dans la suite. Ainsi, la loi de probabilité de la variable aléatoire Y dépend du temps t , elle est notée $p_j(t)$. On note encore $p_j(t, Y = x_i) = p_j(t, x_i)$, la probabilité que $Y = x_i$ à t .

Définition 3.9 : Soit Υ l'ensemble de toutes les valeurs possibles pour $\|\rho_l - \rho_{l'}\|_{st}$ $\forall \rho_l, \rho_{l'} (l \neq l') \in U$. Soit γ une variable aléatoire discrète sur Υ représentant le nombre de strates suffisant séparant $E_*^j(t, +1)$ et $E_*^j(t, -1)$ pour que l'agent a_j tranche entre les deux options. Soit P la loi de probabilité de la variable aléatoire γ et F_γ sa fonction de répartition. Alors, la probabilité d'inclinaison de l'agent a_j pour l'option $x_i = \arg \max_{x \in X} E_*^j(t, x)$ peut être énoncée en fonction de la variable γ de la façon suivante :

$$p_j(t, x_i) = P(\gamma \leq \Delta E^j(t)) = F_\gamma(\Delta E^j(t)) \quad (3.18)$$

Plusieurs lois P peuvent être considérées pour la variable aléatoire γ afin de calculer la probabilité p_j . La Figure 3.2 présente le calcul de $p_j(Y = x_i)$ en fonction $\|E_*^j(t, x_i) - E_*^j(t, x_{i'})\|_{st}$ pour quatre types de lois de γ :

- basiquement, la loi de γ peut être définie par les probabilités de réalisation des éléments de Υ : $\forall \Delta\rho \in \Upsilon : P(\gamma = \Delta\rho) = \begin{cases} 1 & \text{si } \Delta\rho = \Delta\rho_{\min} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$ (Figure 3.2a). Ainsi, $\forall \Delta\rho \geq \Delta\rho_{\min}$, $P(\gamma \leq \Delta\rho) = 1$ (par exemple, $\Delta\rho_{\min} = 1$). Ceci signifie que dès que l'écart d'échelle entre les deux utilités est supérieure ou égale à $\Delta\rho_{\min}$, alors l'acteur exprime une préférence ;
- la loi de γ peut aussi être définie de la façon suivante pour un agent a_j : $\forall \Delta\rho \in \Upsilon : P(\gamma = \Delta\rho) = \begin{cases} 1 & \text{si } \Delta\rho = \Delta\rho_j \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$ où $\Delta\rho_j \geq \Delta\rho_{\min}$. Cela signifie qu'en deçà d'un certain seuil, la différence de gain est perçue comme insignifiante pour l'agent a_j et il fait son choix sans en tenir compte (Figure 3.2b).
- le seuil peut ensuite être considéré comme n'étant pas défini précisément. La connaissance accessible est son appartenance à un intervalle (Figure 3.2c). Cela revient à considérer que sur cet intervalle de valeurs, la fonction de répartition F_γ est une fonction strictement monotone. Sur la Figure 3.2, les bornes de l'intervalle sont 0 et $\Delta\rho_j$;
- lorsque le seuil est considéré comme n'étant pas défini précisément, on peut aussi modéliser la variable aléatoire γ par une loi uniforme discrète sur $[0, \Delta\rho_j]$ dont la fonction de répartition est représentée sur la Figure 3.2d.

C'est cette dernière proposition de loi pour γ qui est choisie pour le calcul de $p_j(t, x_i) = F_\gamma(\Delta E^j(t))$: $p_j(t, x_i)$ est une fonction constante par morceaux sur l'intervalle $[0, \Delta\rho_j]$.

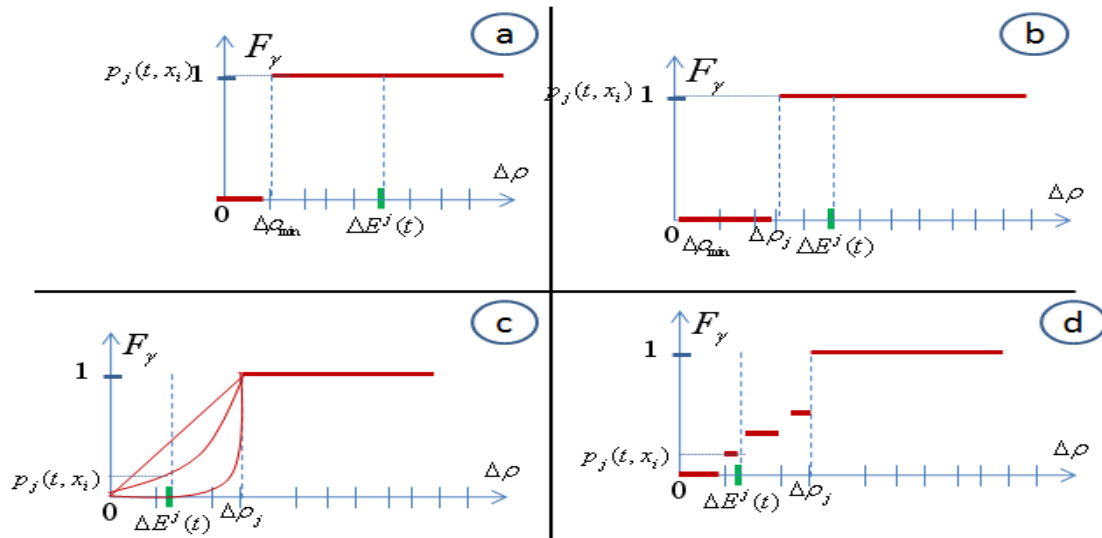


Figure 3.2 : Lien entre la probabilité du choix d'un acteur et la différence d'utilité (le gain)

Définition 3.10 : Une probabilité d'occurrence des vecteurs d'inclinaison $p(t, i)$ peut être définie sur I à l'instant t de la manière suivante :

$$p(t, i) = \prod_{j=1}^n p_j(t, i_j) \quad (3.19)$$

(hypothèse d'indépendance due au choix subjectif de $[0, \Delta\rho_j]$ par l'acteur a_j),

où $p_j(t, i_j)$ est donnée par la formule (3.18).

En pratique, dans notre application, on peut imaginer que les acteurs confient au responsable du débat (le chef de la cellule de crise dans l'exemple du Chapitre 2) leur intention de vote (« à mon avis, il est peut-être préférable, il serait plutôt préférable, il est nettement préférable, etc. ») et que celui-ci dispose ainsi d'une estimation de la distribution de probabilité nécessaire à la gouvernance du débat.

3.4 L'étude de l'influence

La phase de l'influence consiste à identifier l'acteur $a_{s(t)}$ qui a le plus de chance de rallier les autres à son choix pour une convergence plus rapide vers une décision stable (les évaluations des alternatives ne varient plus dans le temps : il n'y a plus d'arguments probants pour que les acteurs reviennent sur leur opinion).

Ce modèle dynamique repose sur l'articulation suivante : les croyances des acteurs à un instant donné t conditionnent les probabilités $p(t, i)$ de leurs inclinaisons dans le calcul de l'indice du pouvoir décisionnel ϕ_{a_j} (cf. formule (3.3) de la section 2.1.1) et modifient l'analyse statistique de la décision de groupe dans la suite du débat. Les probabilités $p(t, i)$

sont ainsi vues comme des probabilités liées à un état des savoirs des acteurs a_j à un instant donné—*i.e.*, leurs *convictions* (cf. section 4) plus ou moins prononcées selon les croyances mises à jour. Sur la base de cette réflexion, un modèle est suggéré pour l'estimation des probabilités $p(t, i)$.

L'indice de pouvoir décisionnel est utilisé pour identifier l'intervenant $a_{s(t)}$ à l'instant t . Cet indice correspond à l'acteur qui est statistiquement celui dont la décision coïncidera le plus souvent avec la décision du groupe. Si on lui donne la parole, il est supposé rallier le maximum d'acteurs possibles à sa préférence :

$$s(t) = \arg \max_k \phi_{a_k}(B, gd, p(t)) \quad (3.20)$$

Le choix de la fonction d'influence B peut être par exemple une majorité comme dans l'équation (3.1) de la section 2.1.1. Cette configuration correspond au comportement collectif et intuitif suivant : lorsque la majorité des joueurs a une inclinaison pour $+1$, alors les autres joueurs finissent par opter pour $+1$. D'autres classifications du comportement collectif potentiels (la polarisation, la pensée de groupe, la psychologie de masse, etc.) peuvent être décrits mathématiquement et intégrés dans notre modèle.

Une fonction d'influence n'est pas forcément définie sous une forme analytique. Elle peut aussi être définie par une règle simple. Par exemple, la règle suivante peut être associée à la fonction dite Gourou : "lorsque a_{Gourou} pense voter $+1$, alors tous les agents décident $+1$ ". Un autre exemple serait le comportement opportuniste, *i.e.*, "quand la plupart de mes supérieurs pensent décider $+1$, alors je décide $+1$ ".

Il est imaginable que B soit apprise par l'expérience. L'identification de B peut alors être perçue comme une étape de fouille de données. B est alors définie en extension. On utilise des bases de données dans lesquelles les décisions collectives ont été enregistrées sous forme de comptes-rendus.

Quand la décision est stable (plus de changement de préférences observés chez les agents), à l'aide de la fonction d'influence B et du vecteur $i(t)$, on peut calculer le vecteur des décisions $B(i, t)$.

Convergence : Lorsque les utilités des alternatives attribuées par les acteurs n'évoluent plus (ou qu'il n'y a plus d'arguments), les probabilités des inclinaisons ne changent plus, on calcule la décision du groupe selon la fonction $gd : I \rightarrow X$. La boucle de contrôle porte sur l'utilité parce que sémantiquement cela nous semble le plus naturel : le débat devient inutile lorsque les positions des acteurs ne changent plus.

La Figure 3.3 propose une représentation de ces étapes proche des « schémas-blocs » de l'automatique. Dans ce schéma, le procédé à contrôler est la délibération, la variable contrôlée est l'utilité attribuée aux alternatives et l'influence est la grandeur de commande :

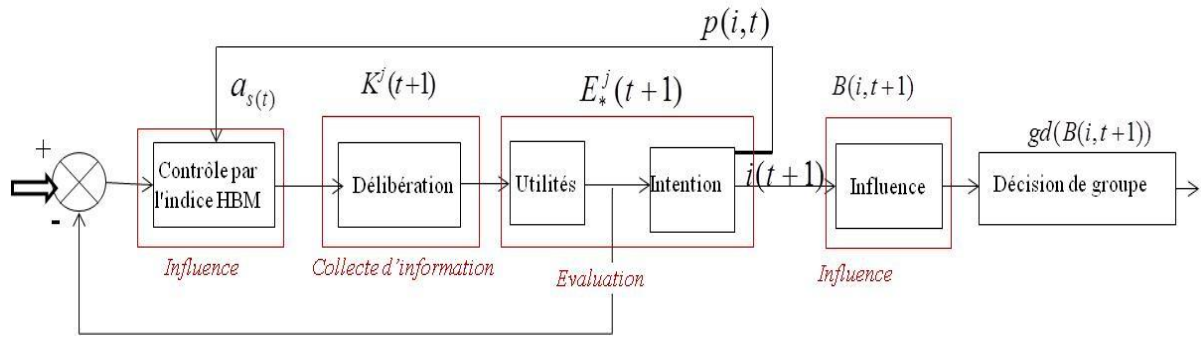


Figure 3.3: Schéma de principe du processus de délibération

3.5 Conclusion

Cette section propose un modèle dynamique du déroulement d'un débat. Le protocole qui régit les interventions et les stratégies d'argumentation des acteurs déterminent la dynamique du débat. Il y est proposé de remplacer le tour de parole imposé statiquement par le protocole par un asservissement sur la dynamique du débat. Il y est aussi proposé d'utiliser comme grandeur de commande du débat (variable d'action) l'influence d'un acteur dans le réseau social constitué par les acteurs du débat. L'indice de pouvoir décisionnel généralisé de (Grabisch and Rusinowska, 2010) est le modèle d'influence qui a été retenu. Ce modèle statistique nécessite de définir les probabilités des inclinaisons des acteurs. Une définition de cette distribution de probabilités basée sur la différence d'utilité entre les alternatives débattues est proposée. L'évolution des croyances des acteurs au cours du débat nécessite alors de calculer cette distribution à chaque fois qu'un argument est échangé. Ce principe semble assez intuitif. En effet, cela signifie, entre autres, que l'influence d'un acteur sur le groupe ne sera pas la même selon la *conviction* plus ou moins marquée des autres acteurs : la notion de conviction utilisée dans (Rico et al., 2004) sera ici assimilée à la probabilité de l'inclinaison (mais ce lien sera discuté plus en détail dans la section qui suit). L'indice de pouvoir décisionnel est alors lui aussi fonction du temps et peut être utilisé comme signal de commande.

Cette section précise le principe de la rétroaction utilisé sur le dialogue. Cependant, le contrôle qui est proposé est élémentaire. La parole est donnée à l'acteur réputé être le plus performant à un instant t . Ceci ne garantit pas de façon certaine une convergence plus rapide, néanmoins cela donne l'opportunité à l'acteur choisi d'exercer habilement son *leadership*. D'autres contrôles plus complexes peuvent être envisagés (par exemple choisir l'acteur le plus influent parmi les opposants à la décision qui semble se profiler afin d'éviter un phénomène de *groupthink*). En d'autres termes, la fonctionnalité proposée ici et implémentée dans notre SIADG a essentiellement pour objet de limiter les erreurs de coordination (dimension collective de l'activité humaine dans le processus de décision) bien que la formalisation qu'elle propose puisse également contribuer à réduire les erreurs d'évaluation et d'intégration des décideurs.

Une des améliorations apportées par ce modèle réside dans la phase de révision des croyances. En effet, l'intégration du nouvel argument dans les bases de croyances stratifiées des acteurs, qui se fait généralement à la strate correspondant au degré de certitude accordé à l'argument par l'intervenant comme, par exemple, proposé dans (Belabbès, 2007), est basée ici sur la révision par conditionnement en fonction de la certitude de l'argument.

4. Modèle de débat basé sur les équations d'état des convictions

Le modèle de la section précédente a essayé de faire le lien entre la révision des connaissances, l'évolution des préférences et l'influence dans un réseau social. L'objectif était de proposer un modèle cognitif du débat plus qu'un modèle prévisionnel difficile à mettre en place dans le cadre général d'un système d'argumentation. Cette section présente un modèle dynamique (Imoussaten et al., 2011) plus macroscopique et statistique pour simuler l'issue d'un débat en fonction de l'évolution stochastique des convictions soumises à un jeu d'influence. Dans ce modèle, seules les inclinaisons initiales des acteurs sont prises en compte sans nécessité la connaissance des arguments dont ces acteurs pourront disposer. Nous proposons d'établir des statistiques quant à l'issue du débat. Le modèle est cette fois-ci purement prévisionnel et n'a rien de cognitif puisque la révision est vue ici comme une boîte noire. Cette approche s'appuie sur l'approche présentée dans la section 2.2.1. L'objectif ici est de donner une sémantique nouvelle aux notions de conviction et de capacité d'un agent sous l'éclairage du pouvoir décisionnel et d'utiliser un formalisme proche de celui des modèles de l'automatique pour établir les équations d'état de cette conviction.

4.1 Pouvoir décisionnel et capacité

Notre modélisation du débat est basée sur une approche relevant de la décision multicritère. Ceci correspond à l'approche présentée dans la section 2.1.2. Comme nous l'avons déjà évoqué, l'influence d'un agent participant à une délibération y est modélisée par sa capacité (3.6) (son importance relative). Cependant, dans notre modèle contrairement à l'approche présentée dans la section 2.1.2, cette capacité est reliée en priorité au concept de pouvoir décisionnel.

Soit un groupe d'acteurs $\{a_1, \dots, a_n\}$. Supposons que l'influence au sein de ce groupe est modélisée par une fonction d'influence B et la décision du groupe est modélisée par une fonction gd . Pour chaque vecteur d'inclinaisons $i \in I$, Bi est le vecteur de décisions obtenu à partir de i et $gd(Bi)$ est la décision finale du groupe (voir la section 2.1.1 pour plus de détails).

Comme $gd(Bi) \in \{-1, 1\}$, alors le pouvoir décisionnel ϕ_{a_j} (cf. Définition 3.2) de chaque acteur $a_j, j \in N$ est dans l'intervalle $[-1, 1]$. Il faut noter que si le pouvoir décisionnel d'un acteur est proche de -1 , cela signifie que l'acteur ne choisit que rarement l'alternative qui correspond au

choix final du collectif : il *échoue* la plupart du temps (voir le concept d'échec présenté dans la section 2.1.1). En revanche, si son pouvoir décisionnel est proche de +1, cela signifie que l'acteur choisit la plupart du temps l'option retenue par le collectif (voir le concept de succès présenté dans la section 2.1.1). Par conséquent, son pouvoir décisionnel est fort. A partir de ce constat, il est possible de normaliser le pouvoir décisionnel de chaque acteur $a_j, j \in N$ pour définir son importance.

Soit p une distribution de probabilité sur I , où $p(i)$ est la probabilité d'occurrence du vecteur d'inclinaisons i . A titre d'exemple, sans aucune autre information, l'importance d'un acteur $a_j, j \in N$, i.e. sa capacité, notée $v_\phi(a_j)$, est introduite dans la définition suivante :

Définition 3.11 : Pour la fonction d'influence B , la fonction de décision de groupe gd et la probabilité p , l'importance d'un acteur $a_j, j \in N$ est définie en fonction d'indice du pouvoir décisionnel ϕ_{a_j} (cf. Définition 3.2) par :

$$v_\phi(a_j) = \frac{1}{2}(\phi_{a_j}(B, gd, p) + 1) \quad (3.21)$$

A noter que pour chaque acteur $a_j, j \in N$, $v_\phi(a_j) \in [0, 1]$ avec $v_\phi(a_j) = 0$ ssi $\phi_{a_j}(B, gd, p) = -1$ et $v_\phi(a_j) = 1$ ssi $\phi_{a_j}(B, gd, p) = 1$.

La capacité v_ϕ peut être généralisée en une capacité normalisée v sur $2^{\{a_1, \dots, a_n\}}$, avec la contrainte : $\forall A, A' \subseteq \{a_1, \dots, a_n\}, A \subseteq A' \Rightarrow v(A) \leq v(A')$. Sans plus d'information, elle peut être énoncée de la façon suivante :

$$\forall A \subseteq \{a_1, \dots, a_n\}, v(A) = \begin{cases} \max_{a_j \in A} v_\phi(a_j) & \text{si } A \subset \{a_1, \dots, a_n\} \\ 1 & \text{si } A = \{a_1, \dots, a_n\} \end{cases} \quad (3.22)$$

La condition $v(\{a_1, \dots, a_n\}) = 1$ est nécessaire pour s'assurer d'avoir une capacité normalisée car il n'est pas certain qu'il existe un acteur dont le pouvoir décisionnel soit égal à 1.

Le pouvoir décisionnel d'un acteur $a_j, j \in N$ sur lequel est basée la capacité v_ϕ , mesure donc les cas où la décision finale de a_j correspond à la décision du groupe. Un acteur avec un pouvoir décisionnel conséquent est alors susceptible d'influencer plusieurs autres acteurs; donc, le pouvoir décisionnel d'un acteur est interprété comme une estimation de son influence au sein du groupe, mais ce n'est pas un indice d'influence au sens de Grabisch et Rusinowska comme rappelé dans la section 2.1.1.

4.2 Evolution des probabilités au cours du temps

Cette sous-section s'intéresse à la construction d'une distribution de probabilité définie sur l'ensemble des vecteurs d'inclinaison I . La distribution en question varie en fonction du temps. Elle sera notée $p[k]$ à l'instant k . A partir de $p[k]$, un pouvoir décisionnel $\phi_{a_j}[k]$, lui aussi fonction du temps, peut alors être établi. La méthode qui suit propose de baser le calcul des probabilités sur les convictions des acteurs par rapport aux différentes alternatives disponibles. Les vecteurs de conviction sont supposés connus. Soit $c(k)$ (respectivement $c'(k)$) le vecteur des convictions des acteurs par rapport à l'alternative +1 (respectivement -1) à l'instant k : $c(k) = (c_{a_1}(k), \dots, c_{a_j}(k), \dots, c_{a_n}(k))$ où $c_{a_j}(k)$ est la conviction de l'acteur a_j par rapport à l'alternative +1 à l'instant k . Lorsque le temps n'est pas mentionné la notation devient c_{a_j} . $c'(k) = (c'_{a_1}(k), \dots, c'_{a_j}(k), \dots, c'_{a_n}(k))$ où $c'_{a_j}(k)$ est la conviction de l'acteur a_j par rapport à l'alternative -1 à l'instant k .

La conviction d'un acteur par rapport à une alternative donnée est corrélée à la probabilité que cet acteur particulier choisit cette alternative, c'est-à-dire la probabilité de son inclinaison telle que définie dans (Grabisch and Rusinowska, 2010).

Soit $i \in I$ un vecteur d'inclinaisons. Chaque coordonnée $i_j, j \in N$ est la préférence de l'acteur a_j et est associée à l'une des options du problème de choix. La notation \bar{c}_{a_j} est

adoptée pour simplifier les équations : $\bar{c}_{a_j} = \begin{cases} c_{a_j} & \text{si } i_j = +1 \\ c'_{a_j} & \text{si } i_j = -1 \end{cases}$.

Ainsi, la définition d'un vecteur de conviction devient :

Définition 3.12 : Soit $i \in I$ un vecteur d'inclinaisons à l'instant k . Le vecteur des convictions associé à $i \in I$ à l'instant k , noté $c(i, k)$, est défini comme suit :

$$c(i, k) = (\bar{c}_{a_1}(k), \dots, \bar{c}_{a_j}(k), \dots, \bar{c}_{a_n}(k)).$$

Soit $i \in I$ un vecteur d'inclinaison et soit $c^i(k)$ l'agrégation des convictions à l'instant k associée au vecteur i . Cette quantité résume la distribution des convictions des acteurs pour le vecteur d'inclinaison i à l'instant k . $c^i(k)$ est « la conviction agrégée » du collectif pour le vecteur d'inclinaisons i à l'instant k . Cette agrégation doit tenir compte de l'importance relative des acteurs et de leurs interactions. La définition suivante donne une méthode de calcul de cette conviction agrégée en utilisant une intégrale de Choquet.

Définition 3.13 : Soient $i \in I$ un vecteur d'inclinaisons et une capacité normalisée $\nu[k]$ définie sur $2^{\{a_1, \dots, a_n\}}$ à l'instant k , alors la conviction agrégée des acteurs à l'instant $k+1$ pour i est définie à partir des convictions des acteurs à l'instant k de la façon suivante :

$$c^i(k+1) = C_{\nu[k]}(\bar{c}_{a_1}(k), \dots, \bar{c}_{a_n}(k)) \quad (3.23)$$

où $C_{\nu[k]}$ est l'intégrale de Choquet par rapport à la capacité $\nu[k]$.

La probabilité d'occurrence des vecteurs d'inclinaisons en fonction du temps est construite par récurrence sur k . La construction de cette probabilité à l'instant $k=0$ est d'abord distinguée, puis, suivie par la présentation de la méthode de calcul à l'instant $k+1$ ($p[k+1]$) en fonction de la probabilité à l'instant k ($p[k]$).

A l'instant $k=0$:

Initialement, chaque acteur attribue un score à chaque alternative dans l'intervalle $[0,1]$. Si, pour chaque acteur, la notation η_{+1} (resp. η_{-1}) désigne le score de l'alternative $+1$ (resp. -1), alors les convictions pourraient être calculées de la façon suivante : $c_{a_j}(0) = \eta_{+1} / (\eta_{+1} + \eta_{-1})$ et $c'_{a_j}(0) = \eta_{-1} / (\eta_{+1} + \eta_{-1})$. Il en résulte que $c_{a_j}(0) + c'_{a_j}(0) = 1$. Initialement, à l'instant $k=0$, si i_j est la préférence de l'acteur a_j alors les probabilités de l'acteur a_j par rapport à sa préférence et l'alternative opposée seraient : $p_{a_j}[k=0](i_j) = c_{a_j}(0)$ et $p_{a_j}[k=0](-i_j) = 1 - c_{a_j}(0)$.

Il est supposé que, avant le début du débat, l'inclinaison de chaque acteur ne dépend pas du réseau social. Les probabilités *a priori* sont donc indépendantes et la distribution de probabilité sur les vecteurs d'inclinaison est donc le produit des probabilités individuelles p_{a_j} à l'instant $k=0$, ceci conduit à l'introduction de la probabilité p à l'instant $k=0$ définie sur I :

$$\forall i \in I, p[k=0](i) = \prod_{j=1}^n p_{a_j}[k=0](i_j) \quad (3.24)$$

Soient une fonction d'influence B et une fonction de décision de groupe gd , il est alors possible de calculer :

- le pouvoir décisionnel de chaque acteur a_j à l'instant $k=0$: $\phi_{a_j}(B, gd, p[0])$ (selon la formule (3.3));
- la capacité $\nu[0]$ sur $2^{\{a_1, \dots, a_n\}}$ à l'instant $k=0$: $\nu_\phi[0](a_j) = \frac{1}{2}(\phi_{a_j}(B, gd, p[0]) + 1)$ (cf. la formule (3.21)), puis la capacité d'une coalition $A \subseteq \{a_1, \dots, a_n\}$, $\nu[0](A)$, selon la formule (3.22) (d'autres capacités pourraient être proposées, le *max* est le modèle par défaut quand on ne dispose d'aucune information sur le groupe).

A l'instant $k+1$ (par récurrence) :

La capacité $\nu[k]$ est utilisée pour calculer $c^i(k+1)$, i.e., la conviction agrégée (3.23) pour le vecteur d'inclinaison i à l'instant $k+1$: $c^i(k+1) = C_{\nu[k]}(\bar{c}_{a_1}(k), \dots, \bar{c}_{a_n}(k))$.

La distribution de probabilité $p[k+1]$, fonction du temps, peut alors être définie comme suit :

$$\forall i \in I, p[k+1](i) = \frac{c^i(k+1)}{\sum_{i \in I} c^i(k+1)} \quad (3.25)$$

Soient une fonction d'influence B et une fonction de décision de groupe gd , il est donc possible de calculer :

- le pouvoir décisionnel de chaque acteur a_j à l'instant $k+1$: $\phi_{a_j}(B, gd, p[k+1])$;
- la capacité $\nu[k+1]$ sur $2^{\{a_1, \dots, a_n\}}$ à l'instant $k+1$ (cf. les formules (3.21) et (3.22)).

Ainsi, une distribution de probabilité variable dans le temps est définie sur l'ensemble I . Notons que la méthode proposée semble être assez intuitive, car elle correspond à l'idée que l'influence sociale d'un acteur dépend du degré de conviction des agents qui l'écoutent.

4.3 Equations d'état de la conviction

Afin de modéliser la relation dynamique dans le débat entre les convictions et les influences qui s'exercent durant la délibération, il est nécessaire d'établir les équations d'état qui régissent cette dynamique. Soient a_l un agent qui écoute et a_s un autre agent qui parle à un instant donné du débat. Leurs convictions à l'instant k pour l'alternative $+1$ (resp. -1) sont alors $c_{a_l}(k)$ et $c_{a_s}(k)$ (resp. $c'_{a_l}(k)$ et $c'_{a_s}(k)$).

Deux grandeurs sont nécessaires pour modéliser le *flux rhétorique* entre les deux agents a_l et a_s , à savoir : leurs convictions et leurs importances relatives à l'instant k , modélisées respectivement par les capacités $\nu_\phi[k](a_l)$ et $\nu_\phi[k](a_s)$.

Quatre types d'échanges rhétoriques sont distingués. Nous allons présenter ces quatre situations dans le cas où l'acteur a_s (l'acteur qui parle) préfère l'alternative $+1$. Deux cas sont d'abord distingués selon que a_s et a_l **partagent la même préférence** ou pas. Quand les acteurs ne partagent pas la même préférence, on parle d'**échange antagoniste**. Chaque cas est ensuite divisé en deux sous-cas : la conviction de a_s est soit supérieure (**échange synergique**) soit inférieure (**échange révisionniste**) à la conviction de a_l .

4.3.1 Les acteurs partagent la même préférence

a. Échange synergique

Cette situation, représentée dans la Figure 3.4, correspond au cas où les deux acteurs ont la même préférence et où $c_{a_s} > c_{a_l}$. Dans ce cas, la préférence de l'acteur a_l est renforcée par l'intervention de l'acteur a_s , qui est résolument favorable à la même alternative que a_l . Le modèle proposé considère que la conviction de l'acteur a_l augmente proportionnellement à l'écart de conviction entre les deux acteurs et à la capacité de l'agent a_s .

L'équation aux différences intuitive s'écrit alors de la façon suivante :

$$c_{a_l}(k+1) - c_{a_l}(k) = (c_{a_s}(k) - c_{a_l}(k))v_\phi[k](a_s) \quad (3.26)$$

qui prend la forme de l'équation de récurrence suivante :

$$c_{a_l}(k+1) = c_{a_l}(k) + (c_{a_s}(k) - c_{a_l}(k))v_\phi[k](a_s) \quad (3.27)$$

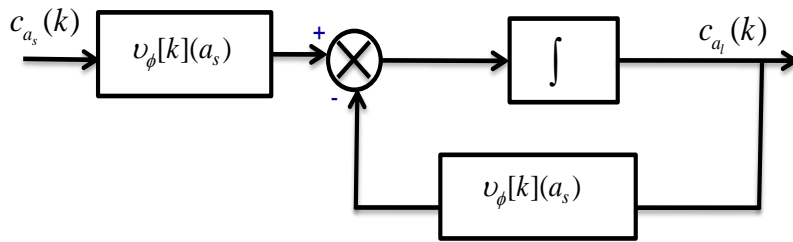


Figure 3.4 : Echange synergique

b. Échange révisionniste

Dans cette situation, l'acteur a_l perçoit l'argument d'un acteur a_s ayant la même préférence que lui, mais plus modérément engagé, comme une réserve ou une critique. La conviction de a_l se trouve atténuée par l'intervention de a_s . Ce cas, représenté sur la Figure 3.5, correspond au cas où les acteurs a_l et a_s ont la même préférence et où $c_{a_l} > c_{a_s}$. L'équation aux différences intuitive s'écrit alors de la façon suivante (voir la Figure 3.5) :

$$c_{a_l}(k+1) - c_{a_l}(k) = -(c_{a_l}(k) - c_{a_s}(k))(1 - v_\phi[k](a_l)) \quad (3.28)$$

ce qui se traduit par l'équation de récurrence suivante :

$$c_{a_l}(k+1) = c_{a_l}(k) + (c_{a_l}(k) - c_{a_s}(k))v_\phi[k](a_l) \quad (3.29)$$

L'acteur a_l entend l'indécision de l'acteur a_s qui partage pourtant sa préférence : a_s contribue à faire douter a_l . La diminution de la conviction (le doute) qu'inspire l'intervention de a_s est

à la fois proportionnelle à $(1 - \nu_\phi[k](a_l))$ (manque d'assurance intrinsèque à a_l lié à sa position sociale dans le collectif) et à l'écart de conviction entre les deux agents a_s et a_l .

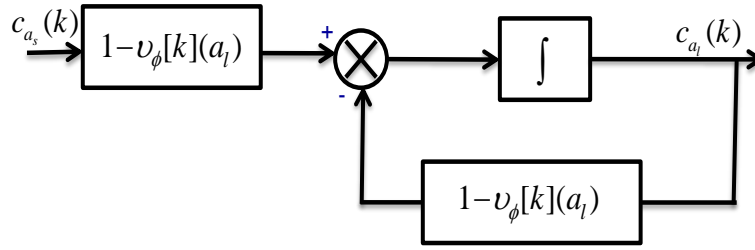


Figure 3.5 : Echange révisionniste

4.3.2 Échange antagoniste

Dans cette situation, les deux acteurs ne partagent pas la même préférence, l'acteur a_l entend néanmoins les atouts de la préférence de a_s . Une intervention convaincante de a_s peut contribuer à faire douter a_l de sa propre préférence alors qu'une intervention nuancée peut au contraire le conforter dans son option.

La quantité $(1 - c'_{a_s}(k))$ mesure l'hésitation de a_s et fournit à a_l une estimation de l'opposition de a_s à l'égard de sa préférence. Selon l'importance de cette hésitation et en utilisant les équations des échanges (3.27) et (3.29) avec $(1 - c'_{a_s}(k))$ à la place de $c_{a_s}(k)$, deux situations sont alors à distinguer (voir la Figure 3.6).

Une préférence trop faiblement marquée de a_s laisse présager une faible opposition à la préférence de a_l et conforte a_l dans son choix. La conviction de a_l est augmentée.

Les équations aux différences intuitives s'écrivent alors de la façon suivante :

a. Échange synergique

Il correspond au cas où $1 - c'_{a_s} \geq c_{a_l}$:

$$c_{a_l}(k+1) = c_{a_l}(k) + (1 - c'_{a_s}(k) - c_{a_l}(k))\nu_\phi[k](a_s) \quad (3.30)$$

Dans, le cas contraire, la conviction de a_l est diminuée par l'intervention de a_s .

b. Échange révisionniste

Il correspond au cas où $1 - c'_{a_s} < c_{a_l}$:

$$c_{a_l}(k+1) = (1 - c'_{a_s}(k)) + (c_{a_l}(k) + c'_{a_s}(k) - 1)\nu_\phi[k](a_l) \quad (3.31)$$

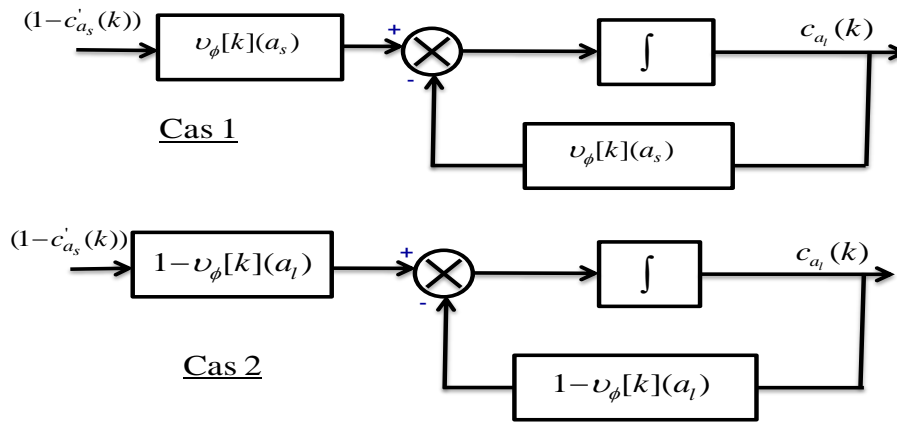


Figure 3.6 : Echange antagoniste

Ces différents types d'échange peuvent être synthétisés en utilisant une intégrale de Sipos comme proposé dans la Propriété 3.1.

Propriété 3.1 : L'équation de révision de la conviction d'un acteur a_l qui écoute l'intervention d'un acteur a_s s'écrit de la façon suivante :

- Si les deux acteurs a_l et a_s partagent la même préférence :

$$c_{a_l}(k+1) = \tilde{C}_v[k](c_{a_s}(k), c_{a_l}(k)) \quad (3.32)$$

- Si les deux acteurs a_l et a_s ne partagent pas la même préférence :

$$c_{a_l}(k+1) = \tilde{C}_v[k]((1 - c'_{a_s}(k)), c_{a_l}(k)) \quad (3.33)$$

où v est la capacité définie dans la formule (3.22) et \tilde{C}_v est l'intégrale de Sipos définie sur v comme dans la formule (3.7) de la section 2.2.1.

Lorsque l'acteur a_s préfère l'alternative -1 , il suffit de reprendre les équations dans les formules ci-dessus et remplacer la conviction c par la conviction c' . Plus précisément, les équations figurant dans le calcul de $c_{a_l}(k+1)$ lorsque les deux acteurs expriment la même préférence, sont les mêmes que celles utilisées pour le calcul de $c'_{a_l}(k+1)$ dans le cas où les deux acteurs ont des préférences opposées et vice-versa.

Pour conclure, le pouvoir décisionnel ϕ confère une sémantique à la capacité v introduite dans les équations de la section 2.2.1, la conviction est associée à la probabilité qu'un acteur soit enclin à retenir une alternative (*i.e.*, la distribution de possibilité définie sur les vecteurs d'inclinaisons). Le modèle de la section 2.2.1 est interprété avec une sémantique proche de la théorie des jeux à travers les concepts d'influence proposés par Grabisch et Rusinowska (voir section 2.1.1). Les équations de révision de la conviction sont présentées comme des bilans

entrées-sorties sur la perception des alternatives pour lesquelles l'intégrale de Sipos est alors simplement une représentation mathématique qui synthétise les différents comportements élémentaires de la révision des convictions. L'introduction du temps dans les équations initiales de Rico et *al.* laisse apparaître les équations de révision de conviction des agents comme des équations de l'état mental de l'acteur (le système du point de vue de l'automatique). Cette représentation permet de doter le modèle de Rico et *al.* d'une sémantique rattachée à la théorie des jeux et tirée des concepts de pouvoir décisionnel de Grabisch et Rusinowska à travers un formalisme proche des modèles dynamiques de l'automatique comme cela avait été simplement suggéré dans le modèle de la section précédente (Imoussaten, Montmain and Rigaud, 2009a).

4.4 Le calcul de préférences

Il reste maintenant à calculer les préférences des agents à chaque étape du débat. C'est ce que nous allons détailler dans cette section. Initialement chaque acteur a_j évalue les alternatives $+1$ et -1 sur l'intervalle $[0,1]$. Les scores obtenus sont désignés par $n_{a_j}^{+1}$ et $n_{a_j}^{-1}$ et permettent de construire une préférence et une conviction initiale : soit $a \in \{-1, +1\}$

- a_j préfère l'alternative a qui a le plus grand score,
- La conviction de a_j pour l'alternative a est $n_{a_j}^a / (n_{a_j}^a + n_{a_j}^{-a})$.

Le changement de préférence dépend de l'évolution de la conviction avec le temps. En outre, pour tout agent a_j , il est supposé qu'il existe un *seuil d'indifférence* défini sur l'écart entre les deux convictions $\varepsilon_{a_j} > 0$ en dessous duquel a_j ne peut pas différencier les deux alternatives. Cette valeur peut être identique ou différente pour chaque agent. Plus précisément, si $|c_{a_j} - c'_{a_j}| < \varepsilon_{a_j}$, alors a_j devient sans préférence ; si $|c_{a_j} - c'_{a_j}| \geq \varepsilon_{a_j}$, alors a_j préfère l'alternative qui a la plus grande conviction.

Enfin, une règle sur la prise de parole est introduite dans le débat à propos des agents sans préférence avérée. En effet, seulement les acteurs ayant une préférence peuvent prendre la parole.

4.5 Illustrations

4.5.1 Simulation de l'issue des débats

Afin d'illustrer le principe de la représentation dynamique d'un débat, reprenons l'exemple de la gestion de crise. Cette fois-ci, au lieu de considérer une situation de décision où interviennent le chef de crise et les experts conseillers, le collectif d'experts est vu comme un groupe d'agents non différenciés ayant initialement des idées sur le choix à faire, mais ceux-ci

peuvent changer d'avis au cours du débat selon les influences qui s'exercent dans le réseau social qu'ils constituent.

Quatre modèles élémentaires sont utilisés pour la fonction d'influence B et ont été mis en œuvre :

- B est la fonction identité *i.e.*, $\forall i \in I, Bi = i$ (cela correspond à la situation où la décision des acteurs reste la même que leur inclinaison de départ, l'influence dans le réseau n'a pas d'effet sur eux) ;
- B est la fonction opposée de la fonction identité *i.e.*, $\forall i \in I, Bi = -i$ (cela correspond à la situation où la décision des acteurs est l'inverse de leur inclinaison de départ) ;
- B est une fonction d'effet de masse psychologique telle que définie dans la section 2.1.1;
- B est une fonction d'influence de type majorité $Maj^{[t]}$ telle que définie dans la section 2.1.1 (cf. formule (3.1)) où $t = \lfloor n/2 \rfloor$ *i.e.*, si la majorité des agents a une inclinaison pour +1, alors tous les agents décident d'opter finalement pour +1 ; sinon, tous les agents décident -1.

Pour ces fonctions d'influence, la fonction de décision de groupe gd considérée, est une simple majorité et à défaut d'autres informations, la capacité utilisée est celle définie dans la section 4.1 (cf. formule (3.22)).

Considérons maintenant un groupe de $n=8$ experts. Les convictions initiales des experts par rapport aux deux alternatives sont considérées comme des variables d'entrée du problème : 50 tirages au sort de ces 8 probabilités initiales ont été effectués. Pour chacun de ces 50 vecteurs de convictions initiales, l'ordre d'intervention des acteurs est alors choisi au hasard : 200 permutations sont choisies aléatoirement (parmi les $n!$ permutations possibles), ceci pour chaque vecteur de convictions initiales.

L'expérimentation a été menée pour chacune des quatre fonctions d'influence ci-dessus. Les résultats des simulations sont présentés dans la Figure 3.7. Pour chacun des 50 vecteurs de convictions initiales choisis au hasard, une barre représente la proportion des sorties du débat en faveur de +1 et de -1 (gris clair pour +1 et gris foncé pour -1). La seconde courbe donne le nombre maximum de tours nécessaires, pour obtenir la décision finale (*i.e.*, lorsque la différence des convictions se stabilise dans le temps) dans chacun des cas. Dans les simulations effectuées, ce nombre ne dépasse jamais 8 tours quelle que soit la fonction d'influence B .

Un seuil d'indifférence $\varepsilon = 0.01$ a été choisi pour tous les acteurs. Les acteurs parlent selon l'ordre généré par les 200 permutations aléatoires à condition qu'ils soient en mesure d'exprimer une opinion claire autrement dit que $|c_{a_j} - c'_{a_j}| \geq \varepsilon$.

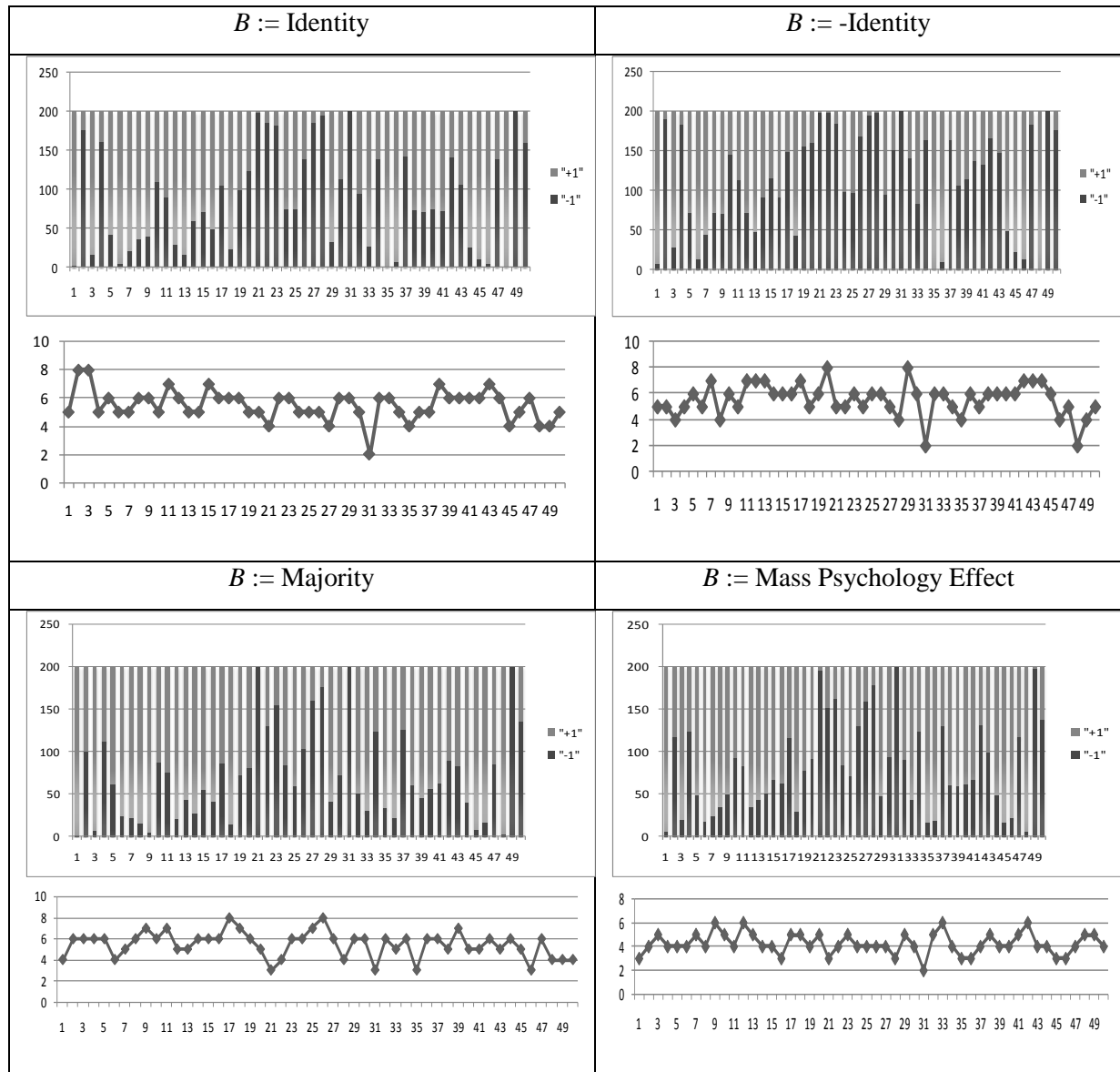


Figure 3.7 : Simulation des issues du débat pour 4 cas d'influence, 50 convictions initiales et 200 permutations

Pour le même vecteur de conviction initiale, nous observons que les résultats du débat peuvent dépendre de l'ordre d'intervention des experts dans le débat, ceci quelle que soit la fonction d'influence B . Ce type de situation peut être interprété comme un ensemble de contextes préférentiels, selon lesquels toute perturbation est capable de changer l'issue du débat. De ce point de vue, la fonction d'influence B est une fonction de perturbation pour ce modèle dynamique du débat. En conséquence, les simulations permettent de vérifier que l'ordre d'intervention des acteurs dans le débat et leur influence sont deux variables déterminantes par rapport à la convergence des équations d'état de la conviction.

L'influence sociale d'un acteur peut donc être considérée comme une perturbation dans le processus de délibération, sauf si elle est pertinemment utilisée par le manager du débat pour orienter la discussion. Dans ce dernier cas, l'influence sociale peut être considérée comme un actionneur qui permet de contrôler l'issue du débat ou du moins d'en accélérer la

convergence. Par exemple, lorsque l'issue du débat est pratiquement certaine, *i.e.*, la barre est presque complètement gris clair ou gris foncé (voir Figure 3.7), alors le contrôle le plus simple pourrait consister à choisir l'ordre d'intervention des acteurs qui minimise le nombre maximum de tours. Des contrôles plus complexes peuvent être naturellement envisagés, mais le but de la méthode reste simplement de proposer un modèle dynamique du débat dans un cadre proche des représentations de la commande de systèmes techniques, afin d'envisager naturellement par la suite des stratégies de contrôle sophistiquées.

4.5.2 Le débat comme un processus d'aide à la décision

Cette section présente une autre application potentielle du modèle dynamique proposé. L'objectif est d'utiliser le modèle comme un système de vote fiable. Pour cet exemple, les deux alternatives $+1$ et -1 ne sont pas équivalentes : $+1$ est supposée être la bonne décision, tandis que -1 est associée à une décision erronée. Cette situation pourrait se produire dans des problèmes de classification lorsque les agents sont des algorithmes de classification concurrents par exemple. Si l'on en reste à notre débat d'experts, on cherche à savoir avec quelle fiabilité ceux-ci ont finalement collectivement opté pour une solution plutôt qu'une autre.

Reprenons les n experts $\{a_1, \dots, a_n\}$. Ils sont censés fournir la réponse correcte la plupart du temps parce qu'ils sont intervenus dans des crises similaires mais, en général, ils sont en désaccord sur des cas individuels et chaque expert a un taux de réussite qui peut être différent de celui des autres. Une solution courante consiste à utiliser un processus de vote afin d'aboutir à une décision de groupe. Plus précisément, soit $b = \{b_1, \dots, b_n\}$ le vecteur des décisions respectives des différents experts, alors la fonction de décision de type majorité du groupe gd peut être écrite de la façon suivante :

$$gd(b) = \begin{cases} +1 & \text{si } \sum_{j=1, n} b_j > 0 \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.34)$$

Par exemple, soit $n=7$ et soient les taux de réussite respectifs des experts : 0.6, 0.7, 0.8, 0.8, 0.6, 0.7, 0.6. Le taux de réussite du groupe selon le vote normal est alors de 0.86 (il faut au moins quatre experts du même avis).

Comment obtenir un meilleur processus d'agrégation permettant d'atteindre un taux de réussite plus élevé et de rendre ainsi la décision plus fiable ?

La première idée est d'utiliser le vote pondéré, *i.e.*, soit $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_n\} \in [0,1]^n$ tel que $\sum_j \alpha_j = 1$, une nouvelle fonction de décision du groupe gd_α peut être écrite de la façon suivante :

$$gd_{\alpha}(b) = \begin{cases} +1 & \text{si } \sum_{j=1,n} \alpha_j b_j > 0 \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.35)$$

Ce résultat indique que même si certains agents possèdent un vote performant, la décision finale doit être partagée par au moins quatre agents. Le taux de réussite individuel de chaque agent peut être utilisé comme une distribution de poids. Il est possible de calculer l'indice de pouvoir de Shapley-Shubik (Shapley, 1953). Pour notre exemple, la valeur obtenue est alors 1/7 pour chaque agent. C'est précisément la valeur que l'on atteint avec un vote sans pondération. Comme les poids ne diffèrent pas considérablement pour un petit nombre d'agents, le signe de la somme pondérée est le même que celui produit lors du vote normal. Ce constat indique que même si certains agents ont un poids plus conséquent sur la décision collective, la décision finale n'en reste pas moins toujours partagée par au moins 4 agents.

En utilisant notre modèle de débat comme processus de vote, un tel résultat ne saurait se produire. Les agents les plus « insignifiants » peuvent aussi être ceux qui changent le plus aisément d'avis. Le débat est ainsi lancé avec la fonction identité comme fonction d'influence et leurs taux de réussite comme convictions initiales. Il est supposé que les 7 experts consultés sont à même de porter un jugement sur la situation et que la bonne option est l'alternative +I.

En reprenant l'exemple précédent, les probabilités a priori des 7 experts de choisir l'alternative +I sont : 0.6, 0.7, 0.8, 0.8, 0.6, 0.7, 0.6. Le débat s'arrête lorsque tous les experts sont d'accord. Il est alors supposé que leurs réponses sont des variables aléatoires indépendantes. 10.000 cas sont étudiés par chaque expert. Pour chaque cas, la réponse de l'agent est déduite à partir de sa probabilité d'être correcte.

Pour chacun de ces 10.000 cas, la décision du groupe est alors calculée selon 3 méthodes :

- choix avec une procédure de vote majoritaire ;
- choix collectif avec une procédure de vote majoritaire pondérée ;
- décision calculée à l'aide du modèle de débat.

Alors que les majorités simple et pondérée obtiennent une réponse correcte avec un taux de réussite de 86%, le modèle de débat atteint un taux de 94%. Par conséquent, l'agrégation à l'aide du débat augmente de manière significative la fiabilité de la procédure de vote.

Afin de vérifier ces résultats encourageants, le même modèle a été testé dans plusieurs situations. Pour 7 experts, plusieurs jeux de probabilités de prédire a priori le bon verdict sont générés aléatoirement. Les sorties des modèles d'agrégation (vote majoritaire, majoritaire pondéré et débat) sont présentées sur la Figure 3.8. Les résultats des deux votes majoritaires sont similaires, mais les résultats diffèrent relativement significativement entre les votes majoritaires et le modèle de débat. Notons que le vote a la même issue pour des valeurs très différentes des distributions de probabilités a priori.

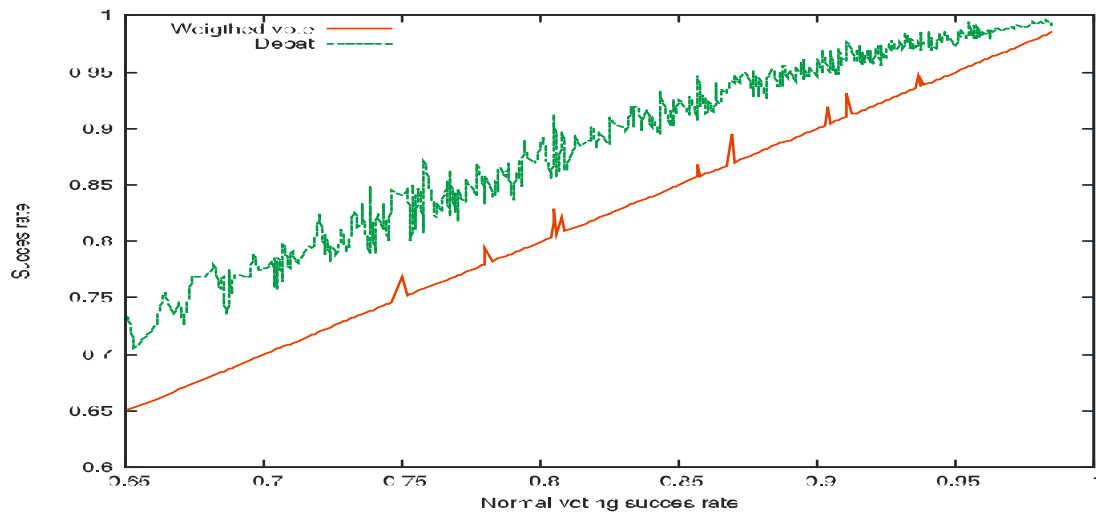


Figure 3.8 : Simulation du vote pondéré et du débat

Le débat donne toujours un meilleur taux, quelle que soit la distribution de probabilités a priori. Le taux de succès du vote pondéré est très proche de celui du vote simple, sauf pour quelques jeux de probabilités très spécifiques qui mettent en valeur la grande expérience de certains experts dans des situations exceptionnelles (points de discontinuités sur la Figure 3.8).

4.6 Conclusion

Les équations d'état établies dans cette section permettent de simuler macroscopiquement l'issue d'un débat en fonction des inclinaisons initiales et des influences qui s'exercent dans le groupe (la fonction d'influence B est donnée a priori). L'issue des délibérations ne dépend pas seulement de l'ordre dans lequel les agents interviennent dans le débat pour exprimer leur opinion, mais aussi de l'influence que chaque agent est en mesure d'exercer sur le réseau social.

Le formalisme du modèle proposé s'apparente aux modèles dynamiques de l'automatique et ouvre des perspectives en termes de contrôle du débat. La gouvernance du débat s'apparente alors à un problème de contrôle commande dont l'objectif pourra être d'atteindre un consensus au plus vite, de conforter une issue plutôt qu'une autre, etc.

Le débat est donc considéré comme un système dynamique continu. Une représentation utilisant des équations d'état a été préférée au cadre d'aide à la décision multicritère de Rico et *al.*, étant donné que le temps apparaît explicitement dans la révision des convictions. Le modèle a été doté d'une nouvelle sémantique empruntée à Grabisch et Rusinowska autour des notions d'influence dans un réseau social et de pouvoir décisionnel. Dans cette extension dynamique, le pouvoir décisionnel est une variable dépendante du temps et peut être utilisé comme un signal de commande dans la boucle de contrôle du débat. Le système d'équations d'état établi dans ce manuscrit permet de simuler stochastiquement l'issue d'un débat et les effets d'une stratégie de contrôle sur cette issue particulière.

Une application possible de ce modèle serait évidemment de simuler l'issue du débat en vue d'obtenir certaines indications quant à la décision collective finale. Lorsque de telles simulations sont effectuées pour un grand nombre de convictions initiales des agents et des permutations sur l'ordre d'intervention des agents, la probabilité que l'issue du débat soit $+I$ ou $-I$ peut être estimée. Ainsi, le modèle de l'influence dynamique peut être appliqué soit à rendre l'issue d'un débat plus certain (cela peut sembler être une procédure malhonnête, quand les agents sont des êtres humains, néanmoins, elle reste une technique pertinente lorsque les agents sont artificiels, tels que des capteurs ou des classifieurs) soit à modifier la dynamique de convergence du débat.

L'outil qui permet de réaliser ces calculs a été implémenté dans notre SIADG. L'objectif de pilotage ou de contrôle de la délibération fait clairement de cette fonctionnalité une aide à la coordination de la dimension collective de l'activité des décideurs. La formalisation cybernétique fournit néanmoins une représentation interprétable de la dynamique du débat et peut ainsi s'avérer utile pour diminuer les erreurs d'évaluation, d'intégration et d'anticipation (modèle prévisionnel) de la dimension cognitive dans le processus de décision.

5. Conclusion

Ce chapitre propose d'utiliser le pouvoir décisionnel comme un signal de commande pour contrôler la dynamique du débat. L'influence sociale entre acteurs de la décision n'apparaît pas comme une perturbation dans la délibération, mais comme une grandeur de régulation. Pour calculer ce pouvoir décisionnel, nous sommes amenés à modéliser le phénomène d'influence entre des agents (fonction d'influence), le moyen de prendre une décision commune (fonction de décision de groupe) et la distribution de probabilité d'opter pour une option ou pour une autre à chaque moment du débat. Si les deux fonctions (influence et décision de groupe) sont liées à l'organisation du groupe et peuvent être différentes d'un groupe à l'autre, le calcul de la distribution de probabilité quant à lui, est d'ordre général à la méthode.

Deux méthodes sont proposées pour le calcul de cette probabilité. La première méthode est basée sur l'utilité accordée à chaque option chaque fois qu'un nouvel argument vient alimenter le débat. Cette méthode a été mise en place pour la première fois dans le cadre des travaux menés sur le cas de la gestion de la décision en cellule de crise. Comme nous l'avons mentionné dans le Chapitre 1, la crise y est vue comme l'interprétation d'une situation où l'homme est confronté à un risque imminent ou avéré. Ce modèle peut être remis en cause de façon événementielle selon l'occurrence de facteurs aggravants. Les acteurs de la cellule de crise doivent réviser et adapter leur modèle en fonction de ces événements. Ils doivent alors délibérer en fonction des nouvelles informations reçues pour définir dynamiquement une représentation unique qui leur permettra alors de coordonner leurs interventions. Le chef de la cellule de crise a tout intérêt à orchestrer efficacement la délibération afin d'agir au plus vite.

La deuxième méthode est basée sur les équations du changement de conviction. Les équations d'état qui sont établies dans cette approche permettent de simuler statistiquement la décision d'un débat en fonction des préférences initiales des acteurs de la décision et des influences qui s'exercent dans le groupe. Le formalisme du modèle qui est proposé est proche de celui utilisé en automatique pour modéliser des systèmes dynamiques continus et leur contrôle. La gouvernance du débat y est clairement vue comme un problème de contrôle occultant même le rôle de l'argument au bénéfice des jeux d'acteurs qui s'exercent au cours de la délibération pour une simulation statistique de l'issue du débat. Deux exemples d'application ont été présentés pour illustrer l'usage de ce type de modèle macroscopique.

Initialement, cet axe de nos travaux a été imaginé pour expliquer a posteriori des accidents passés en analysant le scénario de la délibération qui s'est déroulée entre les intervenants pour comprendre où il y a eu dysfonctionnement comme par exemple, l'accident de la navette Challenger ou, l'accident de l'avion de la compagnie KLM à Tenerife. Dans les deux cas, la décision a été prise sur la base d'un dialogue entre les acteurs de la décision en un temps limité. S'il nous paraît a posteriori bien ambitieux voire absurde de vouloir expliquer ce type d'accident par un quelconque modèle mathématique, cette expérience nous a quand même permis de comprendre que l'argumentation n'explique pas à elle seule l'issue d'une délibération. Dans l'exemple de Challenger, il semble évident que l'ingénieur de niveau inférieur a des arguments techniques clairs et pourtant le niveau supérieur passera outre parce que les pressions politiques et économiques dépassent...l'entendement ! C'est ce constat qui nous a guidés vers la notion d'influence sociale dans le débat. Nous l'avons initialement perçue comme une perturbation potentielle à la dynamique du débat, avant de l'envisager comme une variable d'action pour la gouvernance de la délibération. Un autre type d'applications que nous avons envisagé au début de ces travaux concernait le problème du *desert survival*. C'est un problème qui doit être résolu par un groupe de 5 à 8 personnes. La situation décrite est basée sur plus de 2000 cas réels dans lesquels des hommes et des femmes sont morts ou ont survécu en fonction des décisions qu'ils ont prises pour la survie du groupe. Tout dépend de la façon le groupe va partager ses connaissances... pour choisir une *short list* d'objets statistiquement réputés avoir sauvé le plus de vies dans d'autres situations désespérées. L'idée pour nos travaux était de simuler le débat qui conduirait à la liste des objets de survie que devrait conserver un groupe bien organisé mettant à profit les savoirs de chacun. Enfin, la dernière application envisagée était le pilotage du débat d'experts dans la cellule de crise où il s'agit de fournir au chef de la cellule de crise les éléments dont il a besoin pour piloter efficacement le débat et converger vers une décision la plus consensuelle possible.

Chapitre 4. Amélioration multicritère d'options : pilotage de la négociation dans l'hypothèse collaborative

1. Introduction

Si le processus de décision des deux premiers chapitres permet au décideur de choisir la meilleure alternative parmi un ensemble d'options sur la base des conseils d'experts, l'étape de mise en œuvre de la solution retenue n'y est pas abordée. Ce chapitre tente d'apporter une solution pour cette phase de la décision. Par conséquent, nous sommes amenés à considérer une nouvelle situation de décision où intervient un autre type d'acteurs : les opérationnels. Ainsi, la configuration de la décision multi acteurs de ce chapitre est la suivante : un groupe de décideurs définit une stratégie de conception ou d'amélioration et un groupe d'opérationnels est chargé de la mise en œuvre du programme défini.

Pour satisfaire aux normes institutionnelles évolutives et aux exigences croissantes des clients en termes de sécurité, les industriels doivent sans cesse améliorer leurs outils de production, leurs installations (Mouelhi, Couturier and Redarce, 2009). Cette politique d'amélioration continue est d'autant plus complexe qu'elle engage l'industriel dans une conception multidisciplinaire pour satisfaire des exigences fonctionnelles, techniques, environnementales, économiques et sécuritaires. Dans ce contexte, les industriels se concentrent, plus spécifiquement, sur les activités d'optimisation et d'évaluation du processus de conception pour améliorer et adapter leurs systèmes complexes. Lorsque les concepteurs choisissent une nouvelle configuration ou une meilleure architecture en termes de sécurité, ils doivent vérifier que leur solution ne viole aucune autre contrainte et continue de satisfaire les besoins des clients comme les spécifications techniques de fonctionnement du système. Ils doivent d'une part, identifier les dimensions stratégiques qu'il faut faire progresser pour espérer un gain de performance maximal, et d'autre part, identifier quels paramètres doivent être modifiés pour atteindre les caractéristiques attendues du nouveau système plus sécuritaire. Selon que l'on se place du côté management ou opérationnel, on peut voir le problème sous deux angles différents. D'un côté les dirigeants souhaitent une évolution de leur système, de l'autre côté les exploitants font de leur mieux pour satisfaire l'équipe dirigeante avec les contraintes du terrain. En outre, ces questions ne sont, bien sûr, pas exemptes de contraintes budgétaires. Ces activités sont répétitives et fastidieuses en raison du grand nombre de solutions possibles et des paramètres de conception qui sont parfois continus. Afin de fournir aux concepteurs un outil d'aide à la décision en mesure de les aider lors de l'optimisation et l'évaluation des choix d'architecture, nous examinons quelques modèles mathématiques de l'aide à la décision multicritère, de la recherche opérationnelle et de l'intelligence artificielle.

Si l'on revient au Tableau 1.2 du Chapitre 1, ce chapitre aborde deux items particuliers. D'abord, il s'agit de gérer la négociation qui s'établit entre les décideurs et les opérationnels pour améliorer la sécurité d'une installation : les premiers ont des visées stratégiques qu'ils souhaitent voir réalisées par la mise en œuvre de plans d'actions alors que les seconds doivent gérer les contraintes du terrain pour réaliser les objectifs assignés. On se situe donc dans une décision d'organisation où l'enjeu consiste à fixer des objectifs atteignables.

Le collectif est constitué des équipes opérationnelles et est considéré dans ce chapitre comme un ensemble d'agents collaboratifs (Imoussaten et al., 2011a). En effet, nous distinguons le cas d'un groupe d'agents collaboratifs (ce chapitre) et celui d'un groupe d'agents coopératifs (chapitre suivant) pour établir le plan d'action susceptible d'améliorer la sécurité de façon pertinente (efficacité, efficience, etc.). Dans le cas d'un travail collaboratif, il n'y a pas de répartition a priori des rôles : les individus se subsument progressivement en un groupe qui devient une entité à part entière. La responsabilité est globale et collective. Chacun apporte au groupe dans l'action, chacun peut concourir à l'action de tout autre membre du groupe pour en augmenter la performance. C'est la cohérence du collectif qui permet d'atteindre l'objectif. Si l'on en revient au Chapitre 1, on considérera que dans le cas collaboratif, le groupe agit comme un acteur unique et que l'on est dans le cadre d'un modèle rationnel de la décision. Les opérationnels de la sécurité partagent donc d'une part, un modèle objectif de l'utilité des solutions techniques ou organisationnelles envisageables et d'autre part, la connaissance de l'espace des possibles puisqu'ils mettent en commun l'ensemble de leurs connaissances relatives aux actions susceptibles d'améliorer la sécurité ou les performances de leur installation. En revanche, on parle de travail coopératif quand plusieurs personnes travaillent conjointement dans un même objectif, chacun ayant à sa charge une part bien définie du travail à réaliser suite à une division négociée des responsabilités.

La démarche méthodologique adoptée pour répondre à la problématique de ce chapitre est la suivante :

- Caractérisation du système par les valeurs prises par ses paramètres d'actions ;
- Modélisation des effets de tout changement de paramètres ou de mise en œuvre d'actions sur les caractéristiques du système par un modèle qualitatif ;
- Association des caractéristiques à des mesures de performance (qui correspondent mathématiquement à des fonctions d'utilité) qui permettent d'évaluer les solutions mises en œuvre ;
- Estimation de l'amélioration de la performance globale d'une nouvelle configuration de paramètres par un opérateur d'agrégation sur un espace multicritère prenant en compte les préférences des décideurs ;
- Détermination des performances élémentaires (ou sous objectifs) les plus pertinentes au sens de la stratégie pour atteindre une performance globale fixée ;
- Choix des configurations de paramètres admissibles (ou actions) les moins coûteux (coûteuses) afin que l'amélioration relative à ces performances élémentaires soit efficiente.

En proposant une formalisation du débat qui s'établit entre les stratèges et les opérationnels, les fonctionnalités de notre SIADG proposées dans ce chapitre se donnent pour objectif de contribuer à améliorer la phase d'évaluation de l'amélioration recherchée. La gestion du modèle d'influence qualitatif des paramètres d'actions sur les caractéristiques, la modélisation de la stratégie des décideurs par un opérateur d'agrégation doivent permettre de réduire les erreurs d'évaluation. La procédure itérative d'amélioration multicritère qui est proposée permet de gérer dans le temps l'adéquation entre les objectifs et les capacités de l'industriel, d'adapter la démarche pour être effectif (adéquation entre les objectifs et les moyens), de

définir au final des objectifs atteignables et par là même, de contribuer à réduire les erreurs d'intégration et d'anticipation. L'introduction des contraintes opérationnelles dans la décision a nécessairement un impact sur la gestion des erreurs d'exécution. Enfin, le pilotage de cette décision collective correspond à un cas idéal puisque les agents sont supposés collaboratifs et livrent donc l'intégralité de leurs connaissances : il est donc possible de formuler la mise en œuvre de l'amélioration sous la forme d'un problème d'optimisation multi objectifs global guidé par un critère d'efficacité (coût minimal), ce qui limite très significativement les erreurs de coordination.

Ce chapitre est structuré de la manière suivante. Tout d'abord, la section 2 évoque quelques travaux du génie industriel et du génie logiciel relatifs à l'amélioration d'options dans un contexte d'évaluation multidimensionnel et les modèles de comportement considérés, elle s'intéresse aux modèles d'agrégation et aux caractéristiques les plus stratégiques à améliorer en priorité. La section 3 énonce ensuite formellement le problème d'amélioration de la sécurité d'un système complexe et présente le modèle itératif répondant à la problématique de l'amélioration. La section 4 est consacrée à l'ajustement des paramètres susceptibles de fournir les caractéristiques attendues. Ce dernier point est formulé comme un problème de résolution sous contraintes et un algorithme *branch & bound* y est fourni pour le résoudre efficacement. Enfin, nous concluons sur cette approche itérative de négociation des objectifs atteignables entre les souhaits de la direction et les contraintes de l'opérationnel.

2. Travaux liés : modèles qualitatifs et amélioration de systèmes complexes

2.1 Préférences managériales versus contraintes opérationnelles

La conception ou l'amélioration de systèmes complexes mettent en jeu de multiples critères de décision (Baykasoglu, Oztas and Ozbay, 2002) (Mouelhi, Couturier and Redarce, 2009). A titre d'exemple, on peut citer la conception de l'architecture d'un système militaire (Pignon and Labreuche, 2007) ou encore l'amélioration des performances d'un système industriel (Berrah et al., 2000) (Berrah, Mauris and Montmain, 2008).

Comme mentionné dans l'introduction, deux défis apparaissent lors de la conception d'un système d'amélioration. Premièrement, quelles améliorations des caractéristiques du système (sorties ou observables) seraient susceptibles d'apporter le niveau de sécurité suffisant à un système pour répondre aux exigences des institutionnels, des politiques ? Deuxièmement, quels paramètres du système doivent être modifiés (ou bien quelles actions engagées) pour obtenir les objectifs attendus ? Ces deux étapes dans la démarche d'amélioration font appel à deux modèles bien distincts : la première question requiert un modèle de préférences qui synthétise la stratégie de l'industriel pour satisfaire les exigences extérieures ; la seconde question repose elle, sur un modèle de comportement du système à améliorer. Cette remarque explique pourquoi la littérature sur ce domaine est si variée et abondante.

Les deux questions précédentes laissent apparaître une première partition de la littérature : l'amélioration multicritère d'options industrielles relève-t-elle de la modélisation des préférences ou de la satisfaction des contraintes matérielles ? Est-ce que ces points de vue fournissent des perspectives antagonistes ou complémentaires ? De nombreux travaux sont reliés au management de la performance industrielle. Une grande partie de ceux-ci reposent sur des modèles de préférences. En effet, les performances industrielles sont aujourd'hui définies autour de nombreux critères qui doivent être synthétisés à des fins d'amélioration globale. Le système de mesures de performance (*PMS : Performance Measurement System*) est alors un instrument multicritère pour informer et soutenir les décideurs (Bititci, 1995) ; (Neely, 1999) ; (Kueng and Krahn, 1999). Les PMS nécessitent donc, par nature, l'utilisation de méthodes multicritères (Santos, Belton and Howick, 2002). Les principaux cadres quantitatifs utilisés dans la littérature sur les PMS visent à réduire la dimensionnalité de la performance. Ainsi, s'inscrivent-ils pour l'essentiel dans des approches d'agrégation de type MAUT (Multi Attributes Utility Theory, Théorie de l'Utilité Multi Attributs) (Diakoulaki, Mavrotas and Papagyanakis, 1992) (Kim, Park and Yoon, 1997) (Lee, Kwak and Han, 1995) (Rangone, 1996) (Suwignjo and Bititci, 2000), même si quelques études sont basées sur des modèles de surclassement (Babic and Plazibat, 1998) (Mareschal and Brans, 1991). Les modèles d'agrégation fournissent d'abord la synthèse des expressions des performances élémentaires en une expression globale de performance. Deuxièmement, ils permettent d'identifier les priorités dans la stratégie du décideur (par exemple, l'investissement en matière de formation des opérationnels). Des fonctionnalités d'aide à la décision pour contrôler de manière optimale l'amélioration d'une performance industrielle globale basée sur un modèle d'agrégation ont été proposées dans (Berrah, Mauris and Montmain, 2008) ; (Montmain and Sahraoui, 2008) ; (Sahraoui et al., 2007) ; (Sahraoui et al., 2007), mais les ressources allouées au projet d'amélioration *i.e.*, les contraintes matérielles, ne sont pas prises en compte dans ces approches.

Cette dernière remarque est le fondement de la critique de R. Felix à propos des approches de type MAUT pour l'amélioration de systèmes complexes. Felix a critiqué la façon dont les modèles de préférence ont été établis pour concevoir des projets d'amélioration des performances (Felix, 1994) : selon sa vision, un modèle de préférence doit refléter la nature coopérative ou concurrentielle des objectifs, et cette analyse doit être basée sur les relations entre les actions et les objectifs. Il reproche ainsi aux modèles de la MAUT de définir des cadres axiomatiques pour modéliser le système de préférence des décideurs sans réel fondement puisque c'est le terrain qui, à son sens, devrait guider l'interaction entre les objectifs.

Felix explique les difficultés inhérentes à postuler que la prise de décision doit être effectuée au moyen d'opérateurs d'agrégation basés juste sur quelques axiomes généraux (Felix, 1994) ; (Felix, 2008). En contraste avec ce point de vue, il affirme que les décideurs humains n'ont pas l'habitude de décrire leurs objectifs en utilisant des « formules » et ont tendance à renoncer à l'usage d'opérateurs spécifiés axiomatiquement dans l'élaboration de leurs décisions. Au contraire, il soutient que la façon dont doivent être agrégés les objectifs est guidée par l'explicitation des relations qui existent entre les actions et les objectifs : quelles

actions sont antagonistes, complémentaires, etc. et au regard de quels objectifs ? Pour Felix, les décideurs se concentrent sur la détermination de quels objectifs sont améliorés ou dégradés par quelles alternatives et ne se réfèrent à nulle autre axiomatique. Les contraintes opérationnelles doivent induire le modèle de préférence du décideur.

2.2 Modèles de comportements qualitatifs

Un système complexe peut être caractérisé par des paramètres (ou actions) d'entrée, par exemple la définition précise de toutes les composantes et l'organisation d'une force militaire, ou les paramètres de pilotage d'un système industriel. Le concepteur, l'industriel ou l'exploitant utilise un modèle de préférence basé sur plusieurs critères pour insuffler sa stratégie dans sa politique d'amélioration. Ces critères correspondent souvent à un raffinement des exigences sur les caractéristiques ou attributs du système. Pour l'architecture militaire, ces attributs sont les observables sur le déroulement de la mission opérationnelle et sont en général obtenus par le biais de nombreuses simulations sur des expérimentations d'architectures (Pignon and Labreuche, 2007). Pour le procédé industriel, ces attributs sont des mesures relevées sur le procédé (pureté, concentration, etc.) (Berrah, Mauris and Montmain, 2008).

Une question épineuse lors de la conception de l'amélioration d'un système concerne l'identification de la transformation qui fournit les valeurs des attributs (caractéristiques ou observables) du système obtenues à partir d'un vecteur de paramètres d'entrée. Cette identification requiert de nombreuses simulations ou expériences, et par conséquent est coûteuse et pose vite de sérieux problèmes combinatoires. Pour ces raisons, on doit plus souvent se contenter d'un modèle d'influence qualitatif qui relie paramètres ou actions aux caractéristiques attendues (Felix, 1994) (Felix, 2008) (Chung et al., 2000) (Giorgini et al., 2002) (Gonzalez-Baixaul, do Prado Leite and Mylopoulos, 2004) (Kazman et al., 1994) (Kazman, Klein and Clements, 2000). Par exemple, pour un service de protection radionucléaire, mieux former les agents a une répercussion positive sur le taux d'accidents dans l'industrie nucléaire. Il s'agit là d'une règle d'influence qualitative et non certaine, il serait bien difficile de quantifier le gain en fonction du nombre d'accidents relatif à un personnel mieux formé et un autre moins formé.

Il existe une abondante littérature sur les digraphes de causalité pour décrire les relations entre les variables dans les systèmes complexes. Ce sont des modèles qui ont des objectifs cognitifs et explicatifs. Les cartes cognitives (*CM : Cognitive Maps*) sont l'une de ces tendances. Une CM est un graphe (digraphe) orienté qui explicite les relations de cause à effet entre les grandeurs d'une structure complexe. Cet outil vise à prédire l'évolution d'un système à l'aide d'inférences causales. Ce type d'inférence estime qualitativement la contribution de la variation d'une de ces grandeurs à l'évolution du système.

Les auteurs de (Pena, Sosso and Gutierrez, 2008) fournissent une revue des approches CM et expliquent les différences entre les versions de CM qualitative, floue, probabiliste, bipolaire. Les liens de causes à effets entre les actions et les performances peuvent être interprétés

comme un modèle d'influence possibiliste comme décrit dans (Montmain and Labreuche, 2009), ou comme un modèle d'influence ordinale floue comme proposé dans (Montmain et al., 2010). Les modèles d'influence causale ont également été largement pris en considération à des fins de diagnostic en automatique et en intelligence artificielle (Gentil, Montmain and Combastel, 2004). L'auteur de (Davis, 1983) a écrit qu'un aspect significatif de la connaissance nécessaire pour analyser les régimes perturbés dans les systèmes complexes est une simple compréhension des mécanismes en termes de causalité. Une structure causale fournit alors un outil conceptuel pour le raisonnement sur la façon dont les changements normaux ou anormaux se propagent dans un système. Dans les approches de diagnostic causal, les nœuds sont les variables et les arcs symbolisent les relations entre eux : les relations peuvent être paramétrées par des gains qualitatifs/quantitatifs ou des paramètres temporels plus complexes (délai, temps de réponse, etc.), ainsi les liens de causalité sont alors étroitement liés aux fonctions de transfert de l'automatique (Montmain and Gentil, 2000).

Plus précisément, soit α un ensemble non vide et fini d'actions et \mathcal{g} un ensemble non vide et fini d'objectifs. Soient $g \in \mathcal{g}$ et $a \in \alpha$, respectivement un objectif et une action. Les gains entre les actions d'amélioration et les objectifs ne peuvent, généralement, être identifiés quantitativement quand le système est complexe (Montmain and Labreuche, 2009) ; (Montmain et al., 2010). Le modèle de relation action-objectif peut être purement qualitatif : un arc " $a \xrightarrow{+} g$ " (respectivement, " $a \xrightarrow{-} g$ ") indique que l'action a améliore (respectivement, dégrade) l'objectif g . Quand l'influence d'une action peut être caractérisée plus précisément, un modèle de relation flou entre actions et objectifs est introduit dans (Felix, 1994) (Felix, 2008). Ce modèle introduit deux sous-ensembles flous pour distinguer les actions ayant une influence positive ou négative sur un objectif g : l'ensemble flou des actions qui supportent une amélioration de l'objectif g est noté S_g , et l'ensemble flou des actions qui dégradent l'objectif g est noté D_g . Les deux sous-ensembles flous S_g et D_g sont définis par leur fonction d'appartenance :

- La fonction *d'impact positif* de l'objectif g :
 $S_g(a) = \delta$ si l'action a affecte positivement l'objectif g avec le degré δ ,
 $S_g(a) = 0$, sinon.
- La fonction *d'impact négatif* de l'objectif g :
 $D_g(a) = \delta$ si l'action a affecte négativement l'objectif g avec le degré δ ,
 $D_g(a) = 0$, sinon.

D'autres travaux que ceux de Felix (Felix, 1994) (Felix, 2008) en génie logiciel (goal oriented system management (Gonzalez-Baixaul, do Prado Leite and Mylopoulos, 2004) (Giorgini et al., 2002)) et en génie industriel (Adaptive Systems (Fleurey et al., 2008) (Fleurey and Solberg, 2009)) proposent aussi des modèles de comportement qualitatifs de systèmes complexes. Par exemple, des contraintes de configuration logique peuvent être ajoutées aux contraintes des actions pour qu'elles soient réalisées conjointement comme proposé dans

(Fleurey et al., 2008). Dans (Chung et al., 2000), (Giorgini et al., 2002) et (Gonzalez-Baixaul, do Prado Leite and Mylopoulos, 2004) les auteurs présentent les variantes (paramètres, actions) et les objectifs par un arbre ET/OU (les relations entre les variantes (les paramètres d'action dans notre approche) sont représentées par un graphe biparti dans (Chung et al., 2000)). Dans ces travaux un lien entre une variante a et un objectif g peut être de quatre types :

- $--$: si a est réalisée alors g est complètement insatisfait (cas d'une *cassure*) ;
- $-$: si a est réalisée alors il y a certaines preuves que g soit en partie insatisfait (cas d'*endommagement*) ;
- $+$: si a est réalisée alors il y a certaines preuves que g soit en partie satisfait (cas d'*assistance*) ;
- $++$: si a est réalisée alors g est complètement satisfait (cas de *production*).

Il s'agit de relations d'influences qualitatives permettant de propager la totalité ou une partie des preuves d'une variante a sur un objectif g . Dans (Giorgini et al., 2002), pour chaque objectif g , les preuves de satisfaction et de déni sont modélisées sous la forme d'un couple de valeurs $\langle Sat_g, Den_g \rangle$. Cette idée semble proche de celle proposée dans (Montmain and Labreuche, 2009) et (Montmain et al., 2010) où les auteurs ont repris le modèle de Félix (Felix, 1994) (Felix, 2008) et la philosophie du modèle de (Fleurey and Solberg, 2009) pour les *systèmes adaptatifs* en Génie Industriel. En effet, (Montmain and Labreuche, 2009) et (Montmain et al., 2010) ont proposé un modèle qui permet de calculer le degré d'impact s_g d'un sous-ensemble d'actions A sur un objectif g à partir des impacts élémentaires de chaque action $a \in A$ sur g de la façon suivante :

$$s_g(A) = \begin{cases} \min_{\{a \in A: S_g(a) > 0\}} S_g(a) & \text{si } \min_{\{a \in A: S_g(a) > 0\}} S_g(a) > \max_{\{a \in A: D_g(a) > 0\}} D_g(a) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.1)$$

En posant $Sat_g(A) = \min_{\{a \in A: S_g(a) > 0\}} S_g(a)$ (resp. $Den_g(A) = \max_{\{a \in A: D_g(a) > 0\}} D_g(a)$) le degré de satisfaction (resp. déni ou dégradation) de l'objectif g par le sous-ensemble d'actions A trouve une même interprétation dans les deux approches. Ainsi, avec les nouvelles notations, l'équation (4.1) est équivalente à :

$$s_g(A) = \begin{cases} Sat_g(A) & \text{si } Sat_g(A) > Den_g(A) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.2)$$

Le choix de l'opération « *min/max* » dans l'inégalité $Sat_g(A) > Den_g(A)$ est une contrainte de propagation des influences très dure (il faut que la plus petite valeur des impacts positifs soit plus conséquente que la pire des impacts négatifs), de plus chaque impact positif a un droit de veto à travers l'opérateur d'agrégation $\min_{\{a \in A: S_g(a) > 0\}} S_g(a)$. Ainsi, cette formulation modélise-t-

elle un point de vue très prudent étant donné le manque de connaissances sur l'importance de chaque objectif dans l'objectif global, le comportement du décideur marque une sérieuse aversion au risque. D'autres combinaisons des impacts élémentaires des actions plus tolérantes peuvent être envisagées comme cela sera discuté dans ce chapitre.

2.3 Systèmes adaptatifs dynamiques et ingénierie dirigée par les modèles

Dans un contexte concurrentiel, les systèmes complexes doivent évoluer avec leur environnement pour rester pertinents et efficaces. La conception et l'amélioration des systèmes complexes ont donc à intégrer les aspects d'adaptation par rapport à l'évolution du contexte. C'est le cas pour la sécurité : de nouvelles normes peuvent apparaître (passage à l'union européenne) ou bien l'opinion publique peut peser lourd suite à un accident (accident nucléaire de Fukushima-Daiichi). De nombreux systèmes ont donc besoin de s'adapter à l'évolution du contexte. Ces systèmes constituent les systèmes adaptatifs dynamiques (DAS : Dynamic Adaptive Systems). Les approches d'ingénierie dirigée par les modèles cherchent à décrire les configurations possibles des DAS en phase de conception ou au moment de l'exécution.

Un langage de modélisation spécifique (Domain Specific Modeling Language-DSML) a été proposé pour représenter et gérer la variabilité de ce type de systèmes dans (Fleurey et al., 2008) ; (Fleurey and Solberg, 2009). Un système peut se trouver dans différents modes de fonctionnement (normal ou dégradé par exemple). Il doit remplir un certain nombre de fonctions. La configuration, *i.e.* le choix d'un jeu de variables ou paramètres d'actions, adoptée par le système pour remplir ses fonctions dépend du contexte c (selon le niveau de sa batterie, un robot mobile utilisera ou non, certains capteurs et transmetteurs de son système). Toutes les configurations ne sont pas admissibles et toutes ne réalisent pas non plus les mêmes propriétés. Les propriétés d'un système sont les objectifs que celui-ci doit satisfaire. L'adaptation consiste à chercher en temps réel la configuration admissible du système qui conférera à ses propriétés une satisfaction maximale. L'adaptation d'un système est fonction du contexte, *i.e.*, les valeurs des capteurs (par exemple une batterie faible pour un système autonome), l'environnement (par exemple, l'alternance jour/nuit pour un système de surveillance). Le contexte peut être représenté par des variables simples (par exemple, booléenne ou discrète). La meilleure configuration sera celle qui maximisera la réalisation des objectifs. Il existe des règles fixant la priorité des propriétés selon le contexte. Par exemple pour un système autonome, si la batterie est faible, la propriété *consommation d'énergie* devient très importante alors qu'en temps normal elle est secondaire.

Le processus de sélection de la configuration est précisé dans (Fleurey and Solberg, 2009). Tout d'abord une configuration notée C est définie par les variantes (v_1, \dots, v_p) (les paramètres d'action) qui la constituent. La valeur d'une propriété notée p , pour la configuration C notée $p(C)$, est calculée en additionnant les contributions (impacts) de chaque variante v_j sur p notée $p(v_j)$:

$$\forall C := (v_1, \dots, v_p), p(C) = \sum_{j=1, p} (-1)^{d_p} p(v_j) \quad (4.3)$$

où d_p est la direction de la propriété p : une direction est associée à chaque propriété pour déterminer si la valeur de la propriété doit être minimisée ou maximisée (par exemple, la précision du robot mobile doit être maximisée alors que la consommation de l'énergie doit être minimisée) (Fleurey and Solberg, 2009).

La connaissance de cet impact est qualitative : il est décrit par un type énuméré $\{\text{petit}, \text{moyen}, \text{grand}\}$ et il peut être positif (il va dans le sens de la propriété) ou négatif (il va à l'encontre de la propriété).

Un poids noté $\omega(p, r)$, est attribué à chaque propriété p pour une règle r (puisque les priorités des propriétés dépendent elles-mêmes de la règle appliquée ou contexte). La priorité de la propriété notée $\omega(p)$, est donnée en fonction de tous les poids $\omega(p, r)$ des règles qui s'appliquent dans la configuration (règles valides) : $\omega(p) = \max_{r: \text{valide}} \omega(p, r)$. Ensuite, un score global est attribué à la configuration C notée $S(C)$, il est défini par :

$$S(C) = \sum_p K^{\omega(p)} p(C) \quad (4.4)$$

Où K est une constante supérieure à 1 choisie selon l'application.

Enfin, la configuration C qui maximise la quantité $S(C)$ est sélectionnée.

Ce modèle formel des systèmes adaptatifs est à rapprocher des modèles agents basés sur le triptyque croyance/désir/intention (Brafman, 1987), où la couche croyance correspondrait à la détermination du contexte, celle du désir serait assimilée aux propriétés, et l'intention au choix de la configuration. Dans les approches multi-agents (Brafman, 1987), les préférences sont généralement représentées par des règles simples, tandis que, dans les systèmes adaptatifs (Fleurey and Solberg, 2009), les préférences sont modélisées par une somme pondérée avec des poids qui dépendent du contexte.

Une fois le contexte déterminé, les poids des propriétés sont fixés, les configurations admissibles sont filtrées, puis il s'agit d'identifier la configuration qui apportera le plus haut niveau de satisfaction (le score). Outre le problème combinatoire que cette recherche peut entraîner, les impacts sont qualitatifs et il n'est donc pas possible d'utiliser en théorie les formules de calcul d'impact à l'aide de sommes pondérées comme le proposent les auteurs.

2.4 Amélioration multicritère

Cette sous section a pour but de montrer comment le problème de l'amélioration de la performance d'un système complexe a pu être en partie formulé comme un problème

d'optimisation multicritère dans la littérature (Berrah et al., 2011). La définition d'une amélioration dans un contexte multicritère soulève quelques problèmes (Labreuche, 2004) ; (Sahraoui, 2009).

2.4.1 Agrégation et amélioration multicritère

Tout d'abord, il faut être capable de comparer deux alternatives décrites au moyen d'un ensemble de critères. La théorie de l'utilité multi attributs (MAUT) (Fishburn, 1970) ; (Fishburn, 1982) ; (Keeney and Raiffa, 1976) offre un cadre de modélisation possible pour résoudre ce problème dans le cas d'évaluations quantitatives. Habituellement, cela revient à trouver une fonction d'utilité U à valeurs réelles qui permet de définir un ordre de préférence sur l'ensemble des possibles noté Γ . Cet ordre de préférence est défini pour toute paire d'alternatives (γ, γ') appartenant à Γ de la façon suivante :

$$\gamma \succ \gamma' \text{ (}\gamma \text{ est préféré à } \gamma') \text{ ssi } U(\gamma) > U(\gamma') \quad (4.5)$$

Lorsque les alternatives sont évaluées sur n dimensions, *i.e.*, $X = X_1 \times \dots \times X_n$, un modèle largement étudié est le modèle décomposable de Krantz *et al.* (Krantz et al., 1971), où U a la forme suivante :

$$U(\gamma) = U(x_1, \dots, x_n) = F(u_1(x_1), \dots, u_n(x_n)) \quad (4.6)$$

où chaque alternative γ est représentée par un vecteur (x_1, \dots, x_n) qui représente les valeurs prises par les critères par rapport à cette alternative. Les fonctions notées u_i ($u_i : X_i \rightarrow [0,1]$) sont des utilités à valeurs réelles, n est le nombre de critères et F ($F : [0,1]^n \rightarrow [0,1]$) est un opérateur d'agrégation (ou fonction d'évaluation).

Ainsi, une fonction d'utilité u_i est associée à chaque critère : elle quantifie le degré de satisfaction fourni par une valeur x_i du critère X_i par rapport à une alternative donnée.

2.4.2 Les critères à améliorer en priorité

Soit un système complexe dont la configuration est définie par les paramètres d'entrée notés $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_p)$. La recherche d'une solution efficiente $\gamma^* = (\gamma_1^*, \dots, \gamma_p^*)$ qui atteint la qualité attendue e au coût minimal peut être énoncée sous la forme d'un problème d'optimisation de la manière suivante (Sahraoui, 2009) (Montmain and Labreuche, 2009) :

$$\gamma^* = \underset{\gamma' : \mathcal{F}(u_1(x_1), \dots, u_n(x_n)) = e}{\text{Argmin}} C(\gamma') \quad (4.7)$$

où $C(\gamma^*)$ est le coût de la solution γ^* . Lorsque la résolution du problème de l'équation (4.7) est difficile, une alternative consiste à utiliser des algorithmes d'optimisation de type descente

du gradient pour converger vers la solution optimale itérativement. La méthode de descente du gradient nécessite que l'on connaisse la *direction* dans laquelle il sera le plus avantageux de faire évoluer le profil de performances noté a . Pour résoudre ce problème, un indice (appelé indice de plus-value), noté $\omega_A(F, a)$, qui quantifie la plus-value pour le profil a d'être amélioré sur les critères dans A (sous-ensemble de l'ensemble des critères (X_1, \dots, X_n)), étant donnée la fonction d'évaluation F , a été proposé dans (Labreuche, 2004).

Nous résumons la proposition de (Labreuche, 2004) en quelques lignes. Soit V l'ensemble des fonctions continues définies sur $[0,1]^n$ et à valeurs dans $[0,1]$. Cet espace est doté d'une norme $\forall H \in V, \|H\|_V = \sup_{x \in [0,1]^n} |H(x)|$. L'index ω_A est un opérateur défini de V sur V .

L'index ω_A est défini axiomatiquement dans (Labreuche, 2004) pour tout opérateur $F \in V$. D'abord si F est constante sur les critères de A alors $\omega_A(F, a) = 0$. De plus, si F ne dépend pas du critère X_i , alors $\omega_{A \cup \{X_i\}}(F, a) = \omega_A(F, a)$. Un autre axiome décrit, lorsque F peut être décomposée en n fonctions F_i associées à chaque critère, une estimation optimiste de $\omega_A(F)$ à partir des $\omega_i(F_i)$. Enfin, une propriété d'invariance $\omega_A(F)$ pour des fonctions F à valeur dans $\{0,1\}$ est décrite. Les exigences précédentes combinées avec les contraintes de linéarité, de symétrie et de continuité ($\sup_{F \in V, F \neq 0} \frac{\|\omega_A(F)\|_V}{\|F\|_V} < \infty$) de ω_A conduisent à définir ω de façon unique (Labreuche, 2004) :

$$\omega_A^\wedge(F, a) = \int_0^1 [F((1-\tau)a_A + \tau 1_A, a_{N \setminus A}) - F(a)] d\tau \quad (4.8)$$

où $N = \{1, \dots, n\}$ et $\forall B \subseteq N$, a_B est la restriction de a sur B . L'expression de la formule (4.8) donne la valeur moyenne de la différence de gain $F(g_A, a_{N \setminus A}) - F(a)$ pour les vecteurs d'amélioration $g_A = (1-\tau)a_A + \tau 1_A$ sur la diagonale de a_A ($\tau=0$) à 1_A ($\tau=1$). Par conséquent, l'égalité dans la formule (4.8) donne l'impact moyen d'améliorer de manière uniforme tous les critères de A en même temps si l'on suppose que tous les niveaux possibles d'amélioration (de la stagnation à a_A jusqu'à l'atteinte du profil idéal 1_A) ont la même probabilité de se produire. Les améliorations sur la diagonale de a_A à 1_A permettent d'envisager des améliorations homogènes (sans cette condition, on pourrait recommander d'améliorer les critères de A et s'apercevoir que l'amélioration n'est effective que sur les critères de $A' \subset A$). Le sous-ensemble de critères A^* qui maximise l'indice de plus-value indique les performances qui sont les plus rentables à améliorer en priorité.

En relâchant l'axiome de la décomposabilité à sa forme la plus générale, on obtient un nombre infini d'opérateurs ω satisfaisant les axiomes. Tous les opérateurs sont identiques

lorsque A se réduit à un singleton. Toutefois, l'indice $\hat{\omega}$ donne les plus grandes valeurs parmi tous les opérateurs ω pour tout $F \in V$, $a \in [0,1]^n$ et $A \subseteq N$ (Labreuche, 2004).

L'équation (4.8) favorise les coalitions avec une grande cardinalité. Notons donc que l'équation (4.8) peut être étendue de manière à tenir compte du coût de l'amélioration pour passer d'un profil de performances a à un profil $((1-\tau)a_A + \tau 1_A, a_{N \setminus A})$ (i.e., $(a_A + \tau(1_A - a_A), a_{N \setminus A}))$:

$$\hat{\omega}_A(F, a) = \int_0^1 \frac{[F((1-\tau)a_A + \tau 1_A, a_{N \setminus A}) - F(a)]}{c(a, ((1-\tau)a_A + \tau 1_A, a_{N \setminus A}))} d\tau \quad (4.9)$$

avec sous une hypothèse de linéarité : $c(a, ((1-\tau)a_A + \tau 1_A, a_{N \setminus A})) = \tau \sum_{i \in A} (1 - a_i) cu_i$ avec cu_i un coût unitaire relatif à la dimension i .

L'indice de plus value est donc utilisé quand le problème de l'équation (4.7) est trop difficile à résoudre : la recherche en une passe du profil idéal b de l'équation (4.7) est abandonnée, l'idée est de s'améliorer itérativement au mieux en commençant par améliorer les critères de A^* réputés être les plus stratégiquement rentables ; les actions associées sont mises en œuvre et on itère avec le nouveau profil observé ; l'amélioration continue cesse quand on atteint le niveau de sécurité attendu e (Sahraoui, 2009).

Après cette amélioration itérative, si γ' est le nouveau système, il est caractérisé par un vecteur de performances b tel que $F(b) \geq e$ et $C(\gamma') \triangleq c(a, b)$. La résolution directe de l'équation (4.7) aurait donné un profil γ^* tel que $C(\gamma') \geq C(\gamma^*)$.

(Sahraoui, 2009) explique que les coûts impliqués dans les équations (4.7) et (4.9) ne sont pas directement liés puisque dans la première les coûts sont rattachés aux modifications sur les paramètres du système (i.e., les actions sur le système) et que dans la seconde les coûts sont directement rattachés aux dimensions de la performance. Pour comprendre le lien, il faut considérer que la quantité $c(a, ((1-\tau)a_A + \tau 1_A, a_{N \setminus A}))$ est un coût moyen d'améliorer a en $((1-\tau)a_A + \tau 1_A, a_{N \setminus A})$ qui est évalué indépendamment de toute action d'amélioration. Cette valeur ne peut être déterminée qu'avec l'expérience des dirigeants, habitués à savoir combien leur coûte en moyenne tel ou tel secteur de leur activité. Par exemple, supposons que trois actions puissent améliorer les compétences techniques des employés : la formation continue (coût c_1), une formation intensive collective (coût c_2) et des formations individuelles (coût c_3). Un décideur expérimenté est censé être en mesure d'évaluer les coûts liés à la formation des salariés en moyenne sur plusieurs années, sans connaissance précise sur les attributions des actions de formation, ne serait-ce que pour prévoir son budget.

Il se peut aussi que le dirigeant utilise l'équation (4.9) avec une fonction coût qui pourrait être une fonction du risque, du temps, des ressources, etc. Dans ce cas, il n'y a aucune relation

entre les fonctions de coût des équations (4.7) et (4.9) : un degré de liberté supplémentaire pourrait ainsi être introduit dans la conception du projet d'amélioration.

3. Approche collaborative de l'amélioration de systèmes complexes

La question évoquée au début de ce chapitre « comment aider une organisation à améliorer la sécurité ou la performance d'un système complexe » est assez simple selon l'hypothèse de Felix puisque les interactions entre les objectifs à améliorer sont connus et déterminés par les contraintes du terrain. Dans cette perspective, il ne saurait y avoir de divergence entre ce que souhaitent les dirigeants et ce que peuvent faire les opérationnels puisque le modèle de préférence est induit par le modèle de comportement (*i.e.* les relations entre les actions et les objectifs). Modèle, qui s'il est plus pragmatique, n'est peut être pas plus réaliste, d'une part car il est fort à parier que nombre de décisions stratégiques prises dans une tour de la Défense se prennent sans que les protagonistes aient une réelle conscience de l'outil de production qu'il gouverne depuis Paris, d'autre part il s'agit là d'une perspective *créaticide* du développement car si la stratégie n'était que dictée par la contrainte opérationnelle, l'innovation aurait bien peu de place dans une société pourtant de plus en plus concurrentielle ! Tout objectif serait implicitement atteignable avec les moyens existants.

Dans ce travail, nous n'avons pas une opinion tranchée entre l'utilisation d'un modèle des relations entre les actions et les objectifs et un modèle MAUT. Nous pensons que dans la définition d'un projet d'amélioration d'un système complexe coexistent, d'une part un modèle de préférence qui permet d'identifier les caractéristiques les plus pertinentes à améliorer, d'autre part un modèle de comportement qui permet de comprendre comment ces caractéristiques pourront être atteintes. Distinguer ces deux modèles c'est donner un degré de liberté supplémentaire à la détermination des paramètres satisfaisant (le plan d'action recherché), ce degré de liberté peut coûter cher car il est alors possible que les deux modèles entrent en conflit : ce que l'on veut n'est pas forcément ce que l'on peut faire. Nous croyons donc que ces deux points de vue doivent coexister afin de concevoir pleinement un projet d'amélioration. Les managers prennent naturellement des décisions sans connaître l'ensemble des contraintes opérationnelles au sein de leur entreprise ; les opérationnels ne comprennent pas nécessairement pourquoi il serait plus stratégique ou profitable d'améliorer un but plutôt qu'un autre. La question idéologique derrière ce point de vue pourrait être formulée de la manière suivante : « Le monde est-il régi par les préférences ou par les aptitudes ? ». Les dirigeants cherchent le meilleur pour leur entreprise, alors que les opérationnels font de leur mieux. Dans la conception d'une amélioration de la performance, nous proposons de distinguer clairement les composantes de management et de mise en œuvre du projet, et nous soulignons les liens et les complémentarités entre les deux phases. Nous proposons également un certain nombre de solutions dans la recherche d'une transition consensuelle de la motivation à l'action. Enfin, lorsque les caractéristiques à améliorer ont été discernées, nous proposons un modèle pour calculer le plan d'action optimal pour le collectif une fois les objectifs identifiés.

Dans notre approche, conformément aux travaux de la littérature évoqués dans la section 2, un système complexe est caractérisé par ses paramètres d'entrée $(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_p)$. Soit Γ l'ensemble de toutes les configurations possibles de $(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_p)$. Un système est alors défini par un élément $\gamma \in \Gamma$. Tous les éléments de Γ ne constituent pas nécessairement des systèmes admissibles au regard des exigences du client, des contraintes techniques ou économiques. Nous introduisons alors un ensemble noté $\Gamma_A \subseteq \Gamma$, des éléments pour lesquels le système associé est admissible, c'est-à-dire qu'il satisfait aux exigences de conception.

De plus, tous les éléments de Γ_A ne sont pas indifférents pour l'industriel : il existe des configurations plus en accord avec sa stratégie d'exploitation que d'autres.

L'ensemble des caractéristiques ou attributs est désigné par X_1, X_2, \dots, X_n , et l'ensemble des alternatives est désigné par $X = \prod_{i=1}^n X_i$. On note aussi $N = \{1, \dots, n\}$.

Soit $T: \Gamma_A \rightarrow X$ la transformation qui donne la valeur des attributs du système obtenus à partir du vecteur de paramètres $\gamma \in \Gamma_A$.

Comme expliqué dans la section 2.2, T n'est en pratique pas connue quantitativement, et il est très compliqué d'effectuer l'identification de T sur un système complexe. Le modèle qualitatif qui est proposé pour T semble la seule connaissance raisonnablement identifiable. Nous présenterons donc notre modèle qualitatif dans la section 3.2.

Les orientations stratégiques de l'industriel sont généralement assez complexes et impliquent de nombreux critères. Parmi ces critères, on retrouve systématiquement des critères en rapport avec la qualité ou le coût. L'interaction entre ces critères peut conduire à des modèles de préférence sophistiqués. Par exemple, un coût faible importe peu si la performance du système est mauvaise. Dans cet exemple, les critères opérationnels jouent alors un rôle de veto dans la stratégie de l'industriel.

Par ailleurs, nous conservons les notations introduites dans la section 2.4 : le coût, noté $C(\gamma)$ (respectivement, $C(\gamma', \gamma)$), pour produire la solution γ (respectivement, pour produire la solution γ partant d'un système initial γ'). L'entreprise souhaite identifier les solutions qui atteignent une qualité globale attendue e à coût minimal.

La conception de l'amélioration des systèmes complexes devient donc un problème épineux lorsque le nombre de paramètres et de critères est important. La conception requiert alors des modèles de préférence et des modèles de comportement du système, ceci implique des connaissances quantitatives et qualitatives, et induit des aspects d'optimisation et de recherche combinatoire dans un contexte d'évaluation multidimensionnelle. Ce chapitre propose un modèle formel de l'amélioration d'un système complexe et des modèles de calcul pour identifier les actions d'amélioration efficaces.

La performance du système γ par rapport à X_i , notée P_i , s'écrit de la façon suivante (voir la Figure 4.1 : Labels L_4 à L_6) :

$$P_i(\gamma) = u_i(T_i(\gamma)) = u_i(x_i) \quad (4.10)$$

$P_i(\gamma)$ sera notée P_i quand il n'y a pas d'ambiguïté et u_i est l'utilité introduite dans la formule (4.6).

L'évaluation globale d'un système caractérisé par les paramètres $\gamma \in \Gamma_A$ de profil de performance a est alors définie de la façon suivante :

$$F(u(T(\gamma))) = F(u_1(T_1(\gamma)), \dots, u_n(T_n(\gamma))) = F(a) \quad (4.11)$$

où (voir la Figure 4.1: Labels L_4 à L_6) :

- T_1, \dots, T_n sont les n composantes de T (i.e., $\forall i \in \{1, \dots, n\}, T_i(\gamma) = x_i$) ;
- u_1, \dots, u_n sont les fonctions d'utilité ;
- $u : X \rightarrow [0, 1]^n$ tel que $\forall x = (x_1, \dots, x_n) \in X$ et $\forall i \in \{1, \dots, n\}, (u(x))_i = u_i(x_i)$;
- F est une fonction d'agrégation.

Comme dans la section 2.4, la recherche d'une solution efficace γ^* qui atteint le niveau de performance attendu e au coût minimal peut être énoncé sous la forme d'un problème d'optimisation multi objectifs qui s'écrit avec ces notations :

$$\underset{\gamma \in \Gamma_A, F(u(T(\gamma)))=e}{\text{Arg min}} \quad C(\gamma) \quad (4.12)$$

La section 2.4 a proposé la résolution de ce problème avec l'indice de plus-value et une procédure d'amélioration itérative en faisant abstraction de la façon dont les caractéristiques X_i étaient obtenues par modification des paramètres d'action γ_j à chaque étape de la procédure (la procédure est nécessairement itérative puisque T est un modèle qualitatif et ne permet pas de calculer quantitativement le profil à venir lorsqu'on applique les paramètres γ_j). Il y était supposé que les opérationnels savaient nécessairement quels paramètres actionner pour modifier les caractéristiques désignées par A^* . En pratique, l'identification des paramètres à modifier est déjà un problème combinatoire qui peut s'avérer complexe si p est conséquent. Ainsi, lorsque les critères à améliorer en priorité de A^* ont été calculés comme proposé dans la section 2.4.2, il reste encore à déterminer quels paramètres doivent être ajustés pour que les critères de A^* soient améliorés. Un algorithme *Branch and Bound* sera proposé pour résoudre ce problème (section 4).

Cette section homogénéise les notations que l'on trouve dans la littérature sur l'amélioration des performances dans un formalisme qui lie ce qui relève des préférences de l'industriel

(utilité) et ce qui relève du comportement du système (impact, influence). Cette synthèse est illustrée sur le schéma de la Figure 4.1.

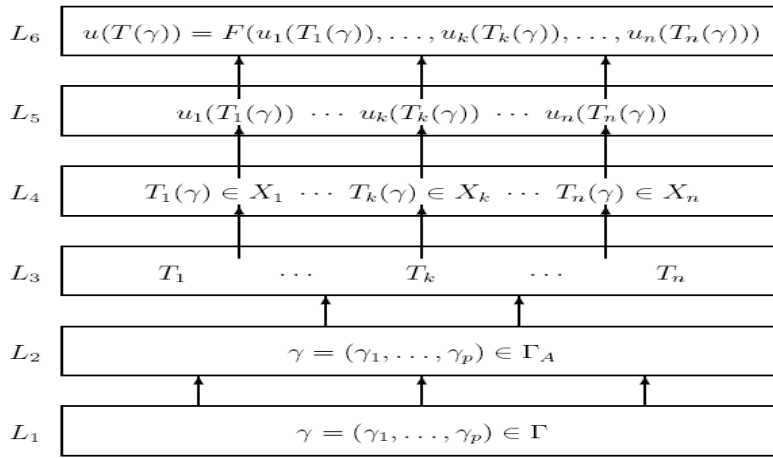


Figure 4.1 : Les différentes grandeurs impliquées dans l'évolution d'un système complexe

L_1 : espace des paramètres ; L_2 : restrictions avec les contraintes opérationnelles ; L_3 : observation du processus ; L_4 : espace des attributs ; L_5 : espace des utilités ; L_6 : satisfaction globale.

3.1 Procédure itérative d'amélioration

Nous proposons une procédure itérative pour la recherche de la configuration qui permettra d'atteindre le niveau de performance global e .

Jusqu'ici le problème d'optimisation a été vu comme un raisonnement sur un système d'indicateurs, sans intégrer les contraintes opérationnelles de la mise en œuvre. L'indice de plus-value (4.9) est un moyen d'engager une amélioration sans chercher à déterminer un profil idéal b à atteindre, mais tout en garantissant qu'il s'agit de l'amélioration la plus pertinente statistiquement. Les paramètres susceptibles d'améliorer les critères identifiés par l'indice de plus-value sont ensuite déterminés. Lorsque l'amélioration correspondante est appliquée sur le système, un nouveau profil de performances est alors atteint et l'indice de plus-value est recalculé avec ce profil initial. Il suffit de réitérer le calcul de l'indice après chaque amélioration jusqu'à ce que l'on obtienne le niveau global de performance e souhaité.

Le processus suivant est proposé :

1. Définir le niveau de performance globale e ;
2. Définir le système initial $\gamma \in \Gamma_A$ à améliorer ;
3. Calculer le profil de performance $a : \forall i \in N, a_i = T_i(\gamma)$;
4. Déduire $p = F(u_1(T_1(\gamma)), \dots, u_n(T_n(\gamma))) = F(a)$. S'arrêter si $p \geq e$;

5. Calculer $A^* = \underset{A \subseteq N}{\text{Arg max}} \omega_A^\wedge(F, a)$ avec (4.9) ;
6. Identifier les paramètres γ^* pour agir sur les critères de A^* (si A^* est réalisable) ;
7. Aller à l'étape 3.

Les sections suivantes ont pour objectif d'assister l'industriel, le concepteur ou l'exploitant lors de l'étape 6, *i.e.*, l'aider à déterminer quelles actions pourraient le plus sûrement améliorer le système selon les critères de A^* .

3.2 Le modèle qualitatif

Le modèle MAUT appréhende uniquement les préférences de l'industriel ou de l'exploitant, sans prendre en considération les contraintes matérielles liées à la mise en œuvre des améliorations. L'étape 5 de la procédure itérative dans la section 3.1 fournit les critères A^* à améliorer en priorité : elle fournit des indications sur l'amélioration la plus efficace à accomplir, mais elle ne dit rien sur la façon dont cette amélioration peut être opérée (par exemple, à ce stade aucune indication n'est donnée concernant l'étape 6 de la procédure de la section 3.1). Ces contraintes opérationnelles, la mise en œuvre de la démarche d'amélioration, ne doivent pas être ignorées dans la conception du projet. La section 4 fournit une aide à la décision pour l'étape 6 : elles visent à recommander quels paramètres d'actions dans Γ_A pourraient améliorer les critères de A^* .

Du point de vue de la représentation des connaissances, le modèle causal qualitatif qui est proposé dans ce chapitre peut être considéré comme une carte cognitive (CM) proche de la représentation des cartes cognitives sous forme de bases de règles floues. Néanmoins, le lien de causalité entre une action et une variable de sortie ou une performance a clairement la sémantique d'une influence. En raison de leur facilité d'utilisation sémantique, nous pensons que les digraphes causaux qualitatifs sont les modèles appropriés pour refléter les connaissances disponibles relatives à la transformation T dans des contextes industriels complexes.

Nous avons choisi de mentionner dans la section 2.2 l'étude de (Fleurey and Solberg, 2009) car elle propose un modèle formel qui est très proche du nôtre, synthétisé sur la Figure 4.1. On y retrouve bien le découpage entre le modèle comportemental du système et le modèle de priorité selon le contexte. Comme nous l'avons fait remarquer il est généralement impossible d'obtenir un modèle quantitatif des relations entre les caractéristiques et les paramètres d'action d'un système complexe. Les auteurs de (Fleurey and Solberg, 2009) vont dans ce sens, généralement on ne connaît pas précisément la conséquence du changement de la configuration sur les propriétés/objectifs, cependant pour simplifier la recherche de la meilleure configuration (le plan d'action dans notre problématique), le recours à la somme pondérée dans le calcul de l'impact d'une configuration comme ils le proposent n'est d'une part pas cohérent avec les fondements de l'approche et d'autre part les variables d'action prenant des valeurs discrètes, cette recherche devient vite un problème combinatoire. Dans ce

chapitre, nous veillons à respecter le caractère qualitatif du modèle de comportement dans le calcul de l'impact et nous proposons un algorithme de recherche efficace de la meilleure configuration/plan d'action. Notons encore que lorsqu'on se fixe des objectifs quantitatifs alors que l'on ne dispose que d'un modèle de comportement qualitatif entre les actions et les objectifs, la recherche de la configuration optimale ne saurait se faire en une seule passe : il est peu probable que la configuration réputée optimale sur la base de calculs avec un modèle qualitatif produise le profil de performances quantitatif attendu. Plusieurs passes seront sans doute nécessaires pour atteindre les objectifs quantitatifs assignés.

À notre avis, le modèle qualitatif de Felix (Felix, 1994) (section 2.2) semble correspondre à une bonne expertise qui est généralement disponible par rapport à la transformation T dans un système complexe : les effets d'une variation d'un paramètre sur les caractéristiques X_i d'un système ne peuvent généralement être décrits qu'avec une sémantique qualitative et non déterministe.

Dans la suite, nous associons à chaque modification d'un paramètre, une action. On peut considérer, par exemple, que deux actions sont liées à chaque paramètre γ_i : sa valeur peut être augmentée ou diminuée. Soit \mathcal{A} l'ensemble de toutes les actions disponibles pour le système étudié.

Soient pour chaque performance partielle $P_i = u_i(T_i(\gamma))$, S_i l'ensemble flou des actions de \mathcal{A} supportant une amélioration de la performance P_i , et D_i l'ensemble flou des actions de \mathcal{A} qui dégradent la performance P_i . Pour chaque action $a_j \in \mathcal{A}$, son *impact positif* $S_i(a_j)$ (resp. *impact négatif* $D_i(a_j)$) est noté δ_{ij}^s (resp. δ_{ij}^d).

Par ailleurs, quand une caractéristique X_i évolue, cela implique donc une variation de la performance associée P_i . Un concepteur sait aussi généralement qualitativement la façon dont évolue P_i quand il y a un changement de X_i , *i.e.*, la monotonie de la fonction qui relie P_i et X_i , au moins localement. Mais nous ne détaillerons pas la construction des fonctions d'utilité depuis les caractéristiques, car ce point ne concernait nos travaux que de manière annexe. Nous mentionnons simplement avoir utilisé MACBETH (Bana E Costa and Vansnick, 1997) pour cet exercice.

L'ensemble des relations qualitatives entre les actions et les performances du système fournit la représentation nécessaire pour supporter le choix des actions à effectuer pour améliorer les performances à un degré d'impact fixé au préalable. La façon dont les actions peuvent être sélectionnées est proposée dans la suite et constitue la suite de notre contribution dans ce chapitre.

Les relations impliquant actions et indicateurs de performance peuvent être représentées par le biais d'un digraphe, tel que (voir l'exemple de la Figure 4.2) pour une action $a_j \in \mathcal{A}$ et une performance $P_i \in N$, l'arc arc_{ij} entre a_j et P_i est défini par :

$$arc_{ij} = \begin{cases} +\delta_{ij}^s & \text{quand } a_j \text{ impact positivement } P_i \\ -\delta_{ij}^d & \text{quand } a_j \text{ impact négativement } P_i \end{cases} \quad (4.13)$$

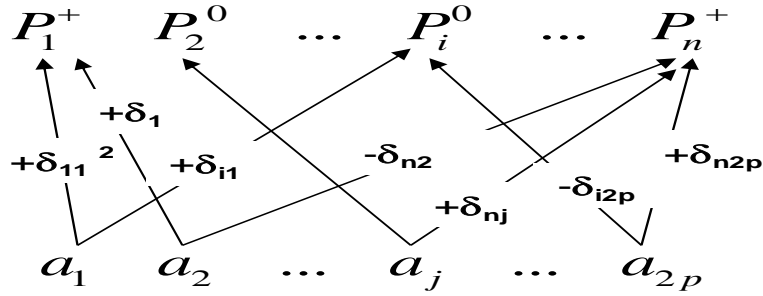


Figure 4.2 : Exemple d'un graphe d'influence

Sur la Figure 4.2, les performances liées à l'ensemble des performances à améliorer en priorité (noté $A^* \subseteq N$) sont désignées par P_i^+ , sinon par P_i^0 pour les performances dans $N \setminus A^*$.

Tous ces concepts sont résumés sur la Figure 4.1 (labels de L_1 à L_4).

Enfin, si l'on revient à notre justification du début de ce chapitre (cf. section 2.2) sur les modèles qualitatifs et causaux (cartes cognitives, graphes causaux pour le diagnostic, etc.) utilisés pour comprendre le fonctionnement de systèmes trop complexes pour être modélisés à travers des modèles numériques classiques, les relations causales entre une action et une performance décrites ci-dessus revêtent clairement une sémantique d'influence. Les liens de cause à effet du digraphe (voir Figure 4.2) peuvent être interprétés comme des relations d'influence non déterministes comme proposé dans (Montmain and Labreuche, 2009) ou bien comme des influences prenant leurs valeurs dans une échelle ordinale comme proposé dans (Montmain et al., 2010).

Les contraintes de configuration logique qui peuvent être ajoutées aux contraintes des actions pour qu'elles soient réalisées conjointement (Fleurey et al., 2008) n'introduisent pas de nouvelles difficultés dans notre approche. Elles pourraient être gérées au niveau du filtrage des configurations admissibles et le problème combinatoire du choix d'un sous-ensemble d'actions susceptibles d'améliorer les performances dans A^* n'en serait que réduit. Dans le modèle proposé dans ce chapitre, le choix de l'opération n'est pas réduit à l'opérateur « *min/max* » mais une généralisation du choix d'opérateur à des points de vue moins prudent est donnée. Ceci est traité à travers la notion de cadre de raisonnement introduite dans ce chapitre.

3.3 Un cadre de raisonnement

L'idée ici est de calculer le degré d'impact (appelé aussi degré d'admissibilité dans la suite) d'un sous ensemble d'actions AP (dit aussi un plan d'action) par rapport à une performance P_i , à partir des degrés d'impact (ou degré d'influence) positifs et négatifs des actions de AP . En d'autres termes, dans ce modèle qualitatif du comportement du système, nous substituons au modèle de comportement T un modèle d'agrégation. Nous suggérons d'abord quelques solutions d'agrégation intuitives parce qu'associées à des comportements décisionnels simples puis nous proposons un modèle formel pour la substitution de T par un modèle d'agrégation. Le choix de ce modèle permet au décideur d'avoir différents comportements décisionnels par rapport à la prise de risques quant au choix des actions à entreprendre pour l'amélioration du système.

Nous reprenons les notions de satisfaction Sat et de déni Den de la section 2.2 pour nos notations. L'ensemble d'actions peut être noté en fonction de l'ensemble des indices J des actions qui le composent de la façon suivante : AP_J . Deux sous-ensembles sont alors associés à AP_J : l'ensemble des indices $J_i^+ = \{j \in J : S_{P_i}(a_j) > 0\}$ et l'ensemble des indices $J_i^- = \{j \in J : D_{P_i}(a_j) > 0\}$.

Une solution possible pour le degré d'admissibilité de AP_J par rapport à une performance P_i , est de reprendre l'opérateur « *min/max* » de l'équation (4.2), qui s'écrit de la façon suivante :

$$s_{P_i}(AP_J) = \begin{cases} \min_{j \in J_i^+} \delta_{ij}^s & \text{si } Sat_{P_i}(AP_J) > Den_{P_i}(AP_J) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.14)$$

où $Sat_{P_i}(AP_J) = \min_{j \in J_i^+} \delta_{ij}^s$ (resp. $Den_{P_i}(AP_J) = \max_{j \in J_i^-} \delta_{ij}^d$) correspond au degré de satisfaction (resp. de dégradation) de la performance P_i par le sous-ensemble d'action AP_J . Nous appelons la contrainte $Sat_{P_i}(AP_J) > Den_{P_i}(AP_J)$, une contrainte de propagation et l'opérateur « *min* » un opérateur d'agrégation.

D'autres opérateurs moins contraignants peuvent être envisagés pour la contrainte de propagation comme pour l'opérateur d'agrégation. Par exemple, un modèle plus flexible basé sur l'opération « *max/max* » pour la contrainte de propagation et l'opérateur « *max* » peut être introduit : $Sat_{P_i}(AP_J) = \max_{j \in J_i^+} \delta_{ij}^s$ et $Den_{P_i}(AP_J) = \max_{j \in J_i^-} \delta_{ij}^d$:

$$s_{P_i}(AP_J) = \begin{cases} \max_{j \in J_i^+} \delta_{ij}^s & \text{si } Sat_{P_i}(AP) > Den_{P_i}(AP) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.15)$$

Cette fois-ci, il suffit qu'il y ait au moins une forte amélioration avec un impact plus conséquent que la pire des dégradations pour que le degré d'admissibilité ne soit pas nul. Le comportement décisionnel décrit ici accepte plus volontiers l'exposition au risque de commettre une erreur d'estimation.

En synthèse de ce modèle qualitatif, nous proposons maintenant un modèle plus formel. Pour chaque performance P_i , l'ensemble des fonctions d'agrégation sur cette performance est noté $A\Phi_i$ et l'ensemble des contraintes de propagation (ou modèle de propagation) est noté ΠM_i . Un cadre de raisonnement sur P_i est ainsi défini comme un couple $(PM, AF) \in \Pi M_i \times A\Phi_i$.

Dans les deux exemples d'agrégation donnés précédemment dans les formules (4.14) et (4.15), deux modèles de propagation PM_1 (« min/max ») et PM_2 (« max/max ») et deux opérateurs d'agrégation AF_1 (min) et AF_2 (max) sont définis pour toute performance i :

$$\begin{aligned} PM_1(AP_j) &:= \min_{j \in J_i^+} \delta_{ij}^s > \max_{j \in J_i^-} \delta_{ij}^d \\ PM_2(AP_j) &:= \max_{j \in J_i^+} \delta_{ij}^s > \max_{j \in J_i^-} \delta_{ij}^d \\ AF_1(AP_j) &:= \min_{j \in J_i^+} \delta_{ij}^s \\ AF_2(AP_j) &:= \max_{j \in J_i^+} \delta_{ij}^s \end{aligned} \tag{4.16}$$

Ainsi, tous les couples $(PM_{l=1,2}, AF_{k=1,2})$ sont des cadres de raisonnement pour toutes les performances. Par exemple, le cadre (PM_1, AF_1) correspond au modèle le plus drastique (attitude pessimiste) et le cadre (PM_2, AF_2) correspond au modèle le plus flexible (attitude optimiste).

Définition 4.1 : l'expression générale du degré d'admissibilité élémentaire peut être écrite pour un cadre de raisonnement $(PM, AF) \in \Pi M_i \times A\Phi_i$ de la façon suivante :

$$s_{P_i}^{AF, PM}(AP_j) = \begin{cases} AF(AP_j) & \text{si } PM(AP_j) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \tag{4.17}$$

Remarque 4.1 : $s_{P_i}^{AF, PM}$ peut être considéré comme la fonction d'appartenance de l'ensemble flou des plans d'action ayant un impact positif sur la performance P_i où $AF(AP_j)$ est le degré de cet impact pour le plan d'action AP_j .

3.4 Agrégation sur A^*

L'idée ici est de calculer le degré d'admissibilité d'un sous-ensemble d'actions AP_J par rapport à l'ensemble A^* des performances à améliorer en priorité, à partir des degrés d'impact (ou degré d'influence) positifs et négatifs des actions de AP_J sur les performances de A^* .

Définition 4.2 : Soit (PM_i, AF_i) le cadre de raisonnement associé à la performance P_i , le degré d'admissibilité (ou degré d'impact) de AP_J , relativement à A^* , est donné par :

$$s_{A^*}(AP_J) = \begin{cases} \min_{i \in A^*} s_{P_i}^{AF_i, PM_i}(AP_J) & \text{si} \\ \forall i \in (N \setminus A^*), (J_i^- \neq \emptyset \Rightarrow s_{P_i}^{AF_i, PM_i}(AP_J) > 0) & \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.18)$$

Remarque 4.2 : $s_{A^*}(AP_J)$ peut être considéré comme la fonction d'appartenance de l'ensemble flou des plans d'action ayant un impact positif sur l'ensemble des performances de A^* où $\min_{i \in A^*} s_{P_i}^{AF_i, PM_i}(AP_J)$ est le degré de cet impact pour le plan d'action AP_J . Cet ensemble est noté $\tilde{\Omega}$.

La condition $(J_i^- \neq \emptyset \Rightarrow s_{P_i}^{AF_i, PM_i}(AP_J) > 0)$ pour toute performance $i \in (N \setminus A^*)$ veut simplement dire que l'amélioration des critères dans A^* ne doit pas impliquer de dégradations dans $N \setminus A^*$, et quand une action a_j dégrade une performance dans $N \setminus A^*$ alors il doit nécessairement exister une action compensatrice $a_{j'}$ tel que $\delta_{ij'}^s > \delta_{ij}^d$. Néanmoins, notons que lorsque le profil des performances est un optimum de Pareto, améliorer les performances de A^* , entraînera nécessairement une dégradation par rapport aux autres performances. Dans ce cas, la formule (4.18) doit être relaxée. A cet effet, on peut imaginer tolérer certaines dégradations sur un sous-ensemble de performances $B^* \subseteq (N \setminus A^*)$. La contrainte $(J_i^- \neq \emptyset \Rightarrow s_{P_i}^{AF_i, PM_i}(AP_J) > 0)$ de la formule (4.18) est maintenue seulement pour les indicateurs de performance dans $N \setminus (A^* \cup B^*)$. Pour les performances dans B^* :

$$s_{P_i}^{AF_i, PM_i}(AP_J) = \begin{cases} \min_{J_i^+} \delta_{ij}^s & \text{si } \min_{J_i^+} \delta_{ij}^s > \max_{J_i^-} \delta_{ij}^d \\ -\max_{J_i^-} \delta_{ij}^d, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.19)$$

La solution devra, alors, optimiser conjointement $s_{A^*}(AP_J)$ et $s_{B^*}(AP_J)$. Un seuil peut également être introduit pour quantifier la détérioration de l'admissibilité.

Le degré d'admissibilité défini dans l'équation (4.18) peut également être « lissé » si on n'accorde pas la même importance relative aux performances élémentaires. En utilisant l'opérateur $\min_{i \in A^*}$, un droit de veto est conféré à chaque critère. Pour une attitude plus flexible, on pourrait introduire un droit de veto limité. Pour cela, il suffit de définir une distribution de poids sur les critères de performance. Soit ω_i le poids attribué à la performance P_i , on a alors :

$$s_{A^*}(AP, \omega) = \begin{cases} \min_{i \in A^*}(\max(1 - \omega_i, s_{P_i}^{AF_i, PM_i}(AP))) & \text{si} \\ \forall i \in (N \setminus A^*), (J_i^- \neq \emptyset \Rightarrow s_{P_i}^{AF_i, PM_i}(AP) > 0) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.20)$$

Dans ce chapitre, la distribution de poids dans l'équation (4.20) est dérivée de l'appartenance à A^* : $\omega_i = 1$ si $i \in A^*$ et $\omega_i = 0$, sinon. Les relations dans les équations (4.18) et (4.20) sont équivalentes dans ce cas simple. Toutefois, d'autres méthodes ont été proposées pour construire des distributions de poids dans le cadre d'améliorations multicritères des performances lorsque les objectifs sont définis de façon plus précise (Montmain and Sahraoui, 2008). Dans ces cas plus complexes, l'intérêt de l'équation (4.20) sur l'équation (4.18) est justifié.

3.5 Plan d'action α -admissible

Définition 4.3 : un plan d'action AP_j est dit α -admissible pour un ensemble de performances A^* quand son degré d'admissibilité $s_{A^*}(AP_j, \omega)$ est supérieur ou égal à α .

Définition 4.4 : un ensemble de plans d'action α -admissible, noté $A\Pi_\alpha$ est une α -coupe de $\tilde{\Omega}$:

$$A\Pi_\alpha = \{AP_j, s_{A^*}(AP_j, \omega) \geq \alpha\} \quad (4.21)$$

Il pourrait y avoir des contraintes supplémentaires entre les actions. Par exemple, il peut ne pas être possible d'effectuer deux actions en même temps. De telles contraintes existent dans le problème de configuration de (Fleurey et al., 2008). Cependant, nous ne considérons pas ces contraintes de manière explicite dans le chapitre car elles ne posent pas de difficultés particulières dans notre approche puisqu'elles permettent même de réduire Γ_A . Dans le cas particulier, où deux actions ou plusieurs actions sont liées à chaque paramètre γ_i : « augmenter γ_i » et « diminuer γ_i » dans ce chapitre, les actions sont mutuellement exclusives. Ceci introduit la définition de consistance suivante :

Définition 4.5 : un plan d'action AP_j est un sous-ensemble d'actions consistantes, *i.e.*, si l'action « augmenter γ_i » (respectivement, « diminuer γ_i ») appartient à AP_j , alors l'action « diminuer γ_i » (respectivement, « augmenter γ_i ») n'appartient pas à AP_j .

3.6 Formalisation du problème de recherche de plan d'action admissible et efficient

Nous pouvons maintenant conclure cette section par la formalisation de la recherche d'un plan d'action admissible efficient, *i.e.*, le plan d'action qui garantit la performance espérée au moindre coût.

Un coût c_j est associé à chaque action a_j : $c_j(a_j)$. Le coût d'un plan d'action $AP_j \in \Pi_\alpha$ peut, ainsi, être défini de la façon suivante : $c(AP_j) = \sum_{j \in J} c_j(a_j)$.

Définition 4.6 : Pour un degré $\alpha \in]0,1]$ donné, un plan d'action α -admissible efficient AP_j est, défini comme : $AP_j = \arg \min_{A \in \Pi_\alpha} c(A)$.

Soit maintenant un degré $\alpha_0 \in]0,1]$ et un coût $C_0 > 0$. Le problème de la recherche de plans d'action admissible efficient, ayant un coût minimal inférieure à C_0 et une admissibilité maximale supérieure à α_0 , revient à chercher les solutions du problème suivant :

$$\begin{cases} \max(s_{A^*}(AP_j), -c(AP_j)) \\ \text{sous } s_{A^*}(AP_j) \geq \alpha_0 \text{ et } c(AP_j) \leq C_0 \end{cases} \quad (4.22)$$

Lorsque le nombre d'actions est élevé la résolution du problème (4.22) pose clairement un problème combinatoire, la section 4 présente une approche de résolution efficace. En effet, dans le cas des actions exclusives, par exemple, il y a $2 \times p$ actions potentielles : $a_1, \dots, a_{2 \times p}$ ($2 \times p$ couples d'actions exclusives). Si l'on rajoute l'action de ne pas modifier un paramètre, 3^p actions globales ou plans d'action résultent de l'application des actions uniques élémentaires sur chaque paramètre.

Ce résultat conclut la phase de formalisation de la recherche des paramètres d'action. Ce modèle est le support de l'aide à la décision que l'on propose à l'exploitant ou l'industriel pour la phase 6 de mise en œuvre de l'amélioration de la procédure itérative de la section précédente : un plan d'action α -admissible efficient peut être planifié.

Notons que l'amélioration recommandée, comme le modèle sur lequel elle s'appuie, reste qualitative. L'amélioration recommandée dit simplement que l'on va améliorer les critères de A^* de façon efficiente, mais ne garantit rien de quantitatif sur cette amélioration. L'exploitant ou l'industriel doit alors procéder par essais et erreurs, à partir d'expériences dans l'application

des actions requises : l'application d'un plan d'action α – *admissible efficient* au profil initial a fournit un nouveau profil de performance b tel que $F(b) \geq F(a)$. Si $F(b)$ reste inférieur au niveau de sécurité attendu e , de nouvelles itérations d'amélioration sont nécessaires, comme indiqué dans la section 3.1. La nouvelle amélioration nécessite toujours les étapes suivantes : 1) calculer les critères de A^* les plus rentables statistiquement avec l'indice de plus-value, 2) identifier le plan d'action admissible efficient qui réalisera des améliorations sur A^* . L'amélioration se poursuit jusqu'à ce que l'objectif e soit atteint.

L'Algorithme 4.1 présente le processus général de l'amélioration :

```

Fonction processus général() :
  - Définir le niveau de sécurité  $e$ ;
  - Définir le profil initial  $\gamma \in \Gamma_A$ ;
  -  $\mathcal{A}$  : ensemble de toutes les actions;
  Répéter
    - Calculer  $a_1 := T_1(\gamma), \dots, a_n := T_n(\gamma)$ ;
    - Dédire  $p = F(u_1(T_1(\gamma)), \dots, u_n(T_n(\gamma))) = F(a)$ ;
    Si ( $p < e$ ) Alors
       $\mathcal{P} = \emptyset$ ; // contiendra des sous-ensembles de  $N$ 
      Répéter
        - Calculer  $A^* = \text{Arg max}_{A \in 2^N \setminus \mathcal{P}} \omega_A^\wedge(F)(a)$ ; //section 2.4.2
        -  $\mathcal{S} = \text{SOLVE}(\mathcal{A}, A^*, \emptyset, \emptyset)$ ;
        -  $\mathcal{P} = \mathcal{P} \cup \{A^*\}$ ;
      jusqu'à ce que ( $\mathcal{S} \neq \emptyset$ )
      - Sélectionner un plan d'action admissible  $SAP_J \in \mathcal{S}$ ;
      - Modifier  $\gamma$  en conséquence;
    Fin Si
  jusqu'à ce que ( $p \geq e$ )
  Retourner  $\gamma$ ;
Fin

```

Algorithme 4.1 : Processus général

La fonction SOLVE est la fonction de résolution du problème (4.22), \mathcal{S} est l'ensemble des solutions et SAP_J est une solution. Ces éléments sont développés dans la section suivante, il s'agit simplement ici de donner le principe général de l'algorithme.

4. Le problème de résolution sous contraintes pour l'amélioration des performances

Lorsque le nombre d'actions est élevé, le calcul des plans d'action admissibles efficaces pose clairement un problème combinatoire. Notre objectif est de déterminer l'ensemble des plans d'action admissibles à coût minimal et admissibilité maximale. Dans la pratique, on choisit de calculer pour un niveau (degré d'admissibilité) donné α , l'ensemble des plans d'action

$AP \in \Pi_\alpha$ ayant le coût minimal par rapport aux plans d'action ayant la même admissibilité ($\forall \alpha \in]0,1], AP^* = \arg \min_{AP \in \Pi_\alpha} c(AP)$), qui définira le front de Pareto des solutions du problème

(4.22). Cette section présente un algorithme de *Branch & Bound* avec des heuristiques appropriées pour résoudre ce problème efficacement. Ces heuristiques dépendent de la fonction d'agrégation qui calcule le degré d'admissibilité et de la contrainte de propagation entre les actions qui améliorent et détériorent une performance, autrement dit les heuristiques sont fonction des cadres de raisonnement (c'est-à-dire de l'attitude du décideur face au risque) de la section précédente. Chaque combinaison d'une fonction d'agrégation et d'une contrainte de propagation définit un cadre de raisonnement spécifique et donc de nouvelles heuristiques.

L'algorithme de *Branch & Bound* que nous proposons a été conçu de façon à ce qu'il reste indépendant du cadre de raisonnement utilisé autant qu'il se peut : c'est-à-dire que nous avons limité l'impact des spécificités des cadres de raisonnement à un nombre limité de fonctions utilisées dans le *Branch & Bound* (voir la méthode **REDUCE** dans la section 4.5).

4.1 Le principe général du *Branch & Bound*

Tout d'abord, l'espace de recherche sur lequel opère le *Branch & Bound* doit être défini. Puisque l'ordre des actions n'est pas pris en compte, *i.e.*, $\{a_1, a_2\} = \{a_2, a_1\}$, identifier un plan d'action admissible dans l'ensemble des toutes les actions \mathcal{A} , consiste à chercher un sous-ensemble d'actions $AP_j \subseteq \mathcal{A}$ qui satisfait les propriétés de coût et d'admissibilité. Ainsi, l'espace de recherche est isomorphe à $\mathcal{P}(\mathcal{A}) = 2^{\mathcal{A}}$. Dans le cas particulier où les actions mutuellement exclusives sont prises en compte (p couples d'actions (« augmenter γ_i », « diminuer γ_i »)), nous allons avoir $|\mathcal{A}| = 2 \times p$ et la taille de l'espace de recherche peut être réduite $3^p < 2^{|\mathcal{A}|}$.

Cet espace de recherche peut être représenté sous la forme d'un arbre binaire qui sera exploré en profondeur d'abord. L'idée de base est qu'une action est associée à chaque nœud d'où partent deux arcs désignés \underline{a} et $\neg a$ (a est l'action associée au nœud (voir Figure 4.3)). L'arc $\neg a$ exprime le fait que l'action a n'est pas prise dans le plan d'action en construction et, à l'opposé, \underline{a} signifie que l'action a est rajoutée au plan d'action en construction. Ainsi tout chemin généré à partir de la racine de l'arbre est un plan d'action. Comme une action ne peut pas être utilisée deux fois dans le même plan d'action, alors les actions ne peuvent apparaître qu'une seule fois dans chaque chemin généré à partir de la racine. L'arbre de recherche est exploré en profondeur d'abord.

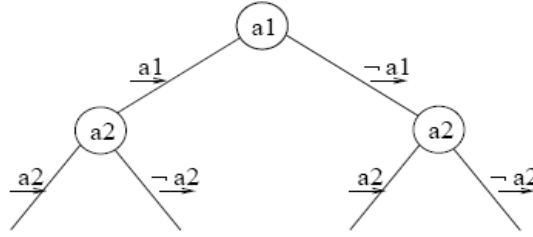


Figure 4.3 : L'espace de recherche est un arbre binaire

Notons que la représentation de l'espace de recherche n'est pas unique (les nœuds peuvent être permutés). Chaque représentation correspond à une manière différente d'explorer l'espace de recherche. Introduire des heuristiques dans l'algorithme de *Branch & Bound* permet de sélectionner une de ces représentation afin d'atteindre efficacement les solutions ainsi que de couper les branches non pertinentes le plus tôt possible. L'algorithme général du *Branch & Bound* qui calcule les plans d'action admissibles est donné dans l'Algorithme 4.2. Il construit et retourne le front de Pareto des solutions (voir section 4.2) du problème (4.22), pour une borne supérieure de coût C_0 , et une borne inférieure d'admissibilité α_0 . L'ensemble des plans d'action admissibles définis sur un ensemble d'actions \mathcal{A} relativement aux contraintes C_0 et α_0 , sera noté $\mathcal{AP}_{\alpha_0, C_0}(\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{P}(\mathcal{A})$ dans la suite.

- L'algorithme calcul $\mathcal{S} = SOLVE(\mathcal{A}, A^*, SAP_0, \emptyset)$ qui renvoie les solutions du Front de Pareto.
- **Fonction** $SOLVE(\mathcal{B}, A, SAP_J, \mathcal{S}) : \rightarrow \text{Pareto-Front-of-Solutions}$
 - \mathcal{B} : L'ensemble des actions restantes
 - A : un sous ensemble de N
 - SAP_J : Le plan d'action courant
 - \mathcal{S} : L'ensemble des solutions du Front de Pareto courant
 - $\mathcal{S}' \leftarrow \emptyset$
 - Si** (IS_ADMISSIBLE(SAP_J, A)) **Alors**
 - $\mathcal{S}' \leftarrow \text{STORE} (SAP_J, \mathcal{S});$
 - Fin Si**
 - Si** ($\neg \text{IS_ADMISSIBLE}(SAP_J, A) \vee \text{cadre utilisant } AF_2$) **Alors**
 - $\mathcal{B}' \leftarrow \text{REDUCE} (\mathcal{B}, A, SAP_J, \mathcal{S});$
 - Si** ($\mathcal{B}' \neq \emptyset$) **Alors**
 - $a_k \leftarrow \text{CHOOSE} (\mathcal{B}', A, SAP_J, \mathcal{S});$
 - $\mathcal{S}'' \leftarrow \text{SOLVE} (\mathcal{B}' \setminus \{a_k\}, A, SAP_J, \mathcal{S});$
 - $\mathcal{S}' \leftarrow \text{SOLVE} (\mathcal{B}' \setminus \{a_k\}, A, SAP_{J \cup \{k\}}, \mathcal{S}'');$
 - Fin Si**
 - Fin Si**
 - Retourner** \mathcal{S}' ;

Fin

Algorithme 4.2 : Détermination des solutions du front de Pareto

Dans l'Algorithme 4.2, la fonction *STORE* est utilisée pour mettre à jour les solutions du front de Pareto lorsqu'un plan d'action admissible y est ajouté (en l'occurrence SAP_j). Elle est décrite dans la section 4.2. *IS_ADMISSIBLE* calcule $(s_A(SAP_j) \geq \alpha_0) \wedge (c(SAP_j) \leq C_0)$. La fonction *CHOOSE* introduit des heuristiques pour sélectionner l'action à choisir au nœud courant (voir la section 4.4). *REDUCE* introduit des heuristiques pour couper les branches le plus tôt possible en supprimant les actions candidates, quand elles sont incohérentes avec le plan d'action SAP_j en cours de construction (voir section 4.5).

Notons qu'avant de résoudre le problème en utilisant *SOLVE*, il est possible de vérifier auparavant qu'il n'y a pas d'incompatibilités évidentes concernant les contraintes liées au coût α_0 et à l'admissibilité C_0 : le décideur est ainsi averti a priori que sa recherche sera vaine.

4.2 Mise à jour des solutions du front de Pareto

Pour être capable d'identifier les plans d'actions les plus pertinents parmi les plans d'action de $\mathcal{AP}_{\alpha_0, C_0}(\mathcal{A})$ et construire le front de Pareto des solutions pertinentes noté $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{AP}_{\alpha_0, C_0}(\mathcal{A})$, il est nécessaire d'introduire un ordre sur $\mathcal{AP}_{\alpha_0, C_0}(\mathcal{A})$. Cet ordre est lié à deux métriques : le degré d'admissibilité s_{A^*} et le coût c . Comme les préférences sont opposées sur ces deux métriques, l'ordre de Pareto \prec_{Pareto} sera lié au couple $(s_{A^*}, -c)$:

$$\begin{aligned} (s_{A^*}(AP), -c(AP)) \prec_{Pareto} (s_{A^*}(AP'), -c(AP')) &\Leftrightarrow \\ (s_{A^*}(AP) < s_{A^*}(AP') \wedge c(AP) \geq c(AP')) & \\ \vee (s_{A^*}(AP) = s_{A^*}(AP') \wedge c(AP) > c(AP')) & \end{aligned} \quad (4.23)$$

Définition 4.7 : un plan d'action $AP \in \mathcal{AP}_{\alpha_0, C_0}(\mathcal{A})$ domine un autre plan d'action $AP' \in \mathcal{AP}_{\alpha_0, C_0}(\mathcal{A})$, que l'on note $AP \prec AP'$, dans le sens de Pareto ssi $(s_{A^*}(AP), -c(AP)) \prec_{Pareto} (s_{A^*}(AP'), -c(AP'))$.

La notation $AP \not\prec_{Pareto} AP'$ signifie que $\neg(AP \prec_{Pareto} AP')$. Le front de Pareto des solutions (plans d'action optimaux) est alors l'ensemble des plans d'action (inclus dans $\mathcal{AP}_{\alpha_0, C_0}(\mathcal{A})$) dans lequel aucun élément n'est dominé au sens de Pareto.

La mise à jour des solutions du front de Pareto est réalisée par la fonction *STORE*. Elle rajoute simplement le plan d'action construit s'il n'est dominé par aucun élément du front \mathcal{S} courant et elle supprime tous les plans d'action de \mathcal{S} qui sont dominés par cette nouvelle solution. L'Algorithme 4.3 propose une implémentation de cette fonction.

```

Fonction STORE(  $SAP_J$  ,  $\mathcal{S}$  ) :  $\rightarrow$  New-Pareto-Front-of-Solutions
   $SAP_J$  : Le nouveau plan d'action
   $\mathcal{S}$  : L'ensemble des solutions du Front de Pareto courant
  Si (  $\exists AP \in \mathcal{S} : SAP_J \prec AP$  ) Alors
     $\mathcal{S}' \leftarrow \mathcal{S}$ 
  Sinon
     $\mathcal{S}' = \{SAP_J\} \cup \{AP \in \mathcal{S} : AP \not\prec SAP_J\}$ 
  Fin Si
  Retourner  $\mathcal{S}'$ ;
Fin

```

Algorithme 4.3 : Stocker le nouveau plan d'action dans le front de Pareto

Notons que si un cadre de raisonnement avec AF_2 est utilisé, lorsque l'on trouve un plan d'action admissible SAP_J , la recherche de solutions doit être poursuivie sur cette branche car il est possible de trouver d'autres solutions incluant SAP_J et n'étant pas dominées par SAP_J (avec une admissibilité et un coût strictement supérieurs).

4.3 Réduction initiale

Il est possible de vérifier préalablement qu'il n'y a pas d'incompatibilités évidentes concernant certaines actions relativement aux contraintes liées au coût α_0 et à l'admissibilité C_0 . Ces actions sont appelées « Restricting Actions ». Elles ne peuvent participer à l'élaboration d'aucun plan d'action admissible pour α_0 et C_0 et peuvent être retirées de l'ensemble des actions avant de résoudre le problème par *SOLVE*.

Définition 4.8 :

- l'ensemble des actions ayant un coût supérieur au coût alloué C_0 , noté RC , est défini par :

$$RC = \{a_j \in \mathcal{A} : c(a_j) > C_0\}.$$

Les actions de RC ne sont pas compatibles avec la contrainte de coût et peuvent être supprimées.

- L'ensemble des actions produisant une amélioration inférieure à α_0 , noté RA_1 , est défini par :

$$RA_1 = \{a_j \in \mathcal{A} : \exists i \in A^*, \delta_{ij}^s < \alpha_0\}.$$

Pour un cadre de raisonnement où l'opérateur d'agrégation est AF_1 de la formule (4.16). Les actions de RA_1 ne sont pas compatibles avec la contrainte d'admissibilité et peuvent être supprimées.

- Pour un ensemble d'actions donné \mathcal{B}_K , le sous-ensemble de ces actions ne générant aucune amélioration supérieure à α_0 pour les performances de A^* et ne compensent aucune dégradation pour les performances de $N \setminus A^*$, que nous notons $RA_2(\mathcal{B}_K)$, est défini par :

$$RA_2(\mathcal{B}_K) = \{a_j \in \mathcal{B}_K : (\forall i \in A^*, \delta_{ij}^s < \alpha_0) \wedge (\forall i \in N \setminus A^*, \delta_{ij}^s \leq \min_{j' \in K_i^d} \delta_{ij'}^d)\} \quad (4.24)$$

Dans un cadre de raisonnement où l'opérateur d'agrégation est AF_2 défini dans la formule (4.16), les actions de RA_2 sont inutiles et peuvent être supprimées. Initialement, $\mathcal{B}_K = \mathcal{A} \setminus RC$.

Par construction, les réductions ci-dessus ne changent évidemment pas le front de Pareto des solutions. Par conséquent, en fonction de l'opérateur d'agrégation AF_i utilisé, les résultats suivants sont vérifiés :

$$\begin{aligned} AF_1 : SOLVE(\mathcal{A} \setminus (RA_1 \cup RC), SAP_\emptyset, \emptyset) &= SOLVE(\mathcal{A}, SAP_\emptyset, \emptyset) \\ AF_2 : SOLVE(\mathcal{A} \setminus (RA_2(\mathcal{A} \setminus RC)), SAP_\emptyset, \emptyset) &= SOLVE(\mathcal{A}, SAP_\emptyset, \emptyset) \end{aligned} \quad (4.25)$$

Les réductions concernant RC et RA_1 dépendent uniquement des relations entre les paramètres internes δ_{ij} et les paramètres externes C_0 et α_0 . Par conséquent, ces réductions seront appliquées une seule fois avant l'utilisation de $SOLVE$. Ce qui n'est pas le cas pour les réductions concernant RA_2 qui dépendent des relations entre plusieurs paramètres internes δ_{ij}). Ainsi, les réductions de RA_2 doivent être appliquées à chaque fois que $SOLVE$ est exécuté.

4.4 Sélection de l'action : (CHOOSE)

Cette sous-section fournit les heuristiques utilisées dans la fonction *CHOOSE* pour sélectionner l'action du nœud courant de l'arbre dans l'espace de recherche. L'objectif de la sélection de l'action est de choisir une action susceptible de produire une conclusion (positive ou négative) aussi vite que possible, *i.e.* de clore la recherche sur cette branche au plus tôt. Le principe de la sélection requiert que l'action compense nécessairement, une dégradation issue des étapes précédentes de la construction du plan d'action courant SAP_j (voir section 4.4.1). Pour accélérer le processus (couper la branche le plus tôt possible) (voir les sections 4.4.2 et 4.4.3), le choix se fait prioritairement sur les actions induisant les contraintes les plus drastiques.

L'Algorithme 4.4 fournit le principe général pour la sélection de l'action.

La sélection de l'action au nœud courant dans l'algorithme *CHOOSE* (voir Algorithme 4.4), dépend du cadre de raisonnement (PM_l, AF_k) utilisé uniquement pour les calculs internes de *MR* (4.28).

L'algorithme *CHOOSE* est composé de quatre parties :

- 1) Sélectionner les actions qui compensent les dégradations générées par SAP_J ;
- 2) Préférer les actions qui améliorent des performances dans A^* ;
- 3) Sélectionner les actions qui génèrent les contraintes les plus drastiques ;
- 4) Sélection finale dans l'ensemble des actions restantes.

```

Fonction CHOOSE( $\mathcal{B}$  ,  $SAP_J$  ,  $\mathcal{S}$ ) :  $\rightarrow$  action
   $\mathcal{B}$  : L'ensemble non-vide des actions restantes
   $SAP_J$  : Le plan d'action courant
   $\mathcal{S}$  : L'ensemble des solutions du Front de Pareto courant
  // Sélectionner des actions qui compensent des dégradations (NS
  4.4.1)
  [1] Si ( $NS(\mathcal{B}, SAP_J) \neq \emptyset$ ) Alors
    Si ( $\exists i_0 / |NS_{i_0}(\mathcal{B}, SAP_J)| = 1$ ) Alors
      Retourner  $a_j / a_j \in NS_{i_0}(\mathcal{B}, SAP_J)$ ;
    Fin Si
     $MinCard \leftarrow \{ \text{Argmin}_{i \in N} |NS_i(\mathcal{B}, SAP_J)| \}$ ;
     $\mathcal{B}' \leftarrow \bigcup_{i \in MinCard} NS_i(\mathcal{B}, SAP_J)$ ;
  Sinon
     $\mathcal{B}' \leftarrow \mathcal{B}$ 
  Fin Si
  // Sélectionner des actions qui améliorent des performances
  [2]  $\mathcal{X} \leftarrow \{ a_j \in \mathcal{B}' : \exists i \in A^* / s_{P_i}(SAP_J) < s_{P_i}(SAP_J \cup a_j) \}$ 
  // Sélectionner des actions qui introduisent de nouvelles con-
  traintes (MC 4.4.2)
  // en fait  $MC(\mathcal{X}, SAP_J) \neq \emptyset$  sauf si  $\mathcal{X} = \emptyset$ 
  Si ( $\mathcal{X} \neq \emptyset$ ) Alors
    [3] Si ( $|MC(\mathcal{X}, SAP_J)| == 1$ ) Alors
      Retourner  $a_j / a_j \in MC(\mathcal{X}, SAP_J)$ ;
    Fin Si
     $\mathcal{B}'' \leftarrow MC(\mathcal{X}, SAP_J)$ ;
  Sinon
    [4] Si ( $|MC(\mathcal{B}', SAP_J)| == 1$ ) Alors
      Retourner  $a_j / a_j \in MC(\mathcal{B}', SAP_J)$ ;
    Fin Si
     $\mathcal{B}'' \leftarrow MC(\mathcal{B}', SAP_J)$ ;
  Fin Si
  // Sélectionner des actions qui réduisent le plus possible  $\mathcal{B}''$  (MR
  4.4.3)
  // en fait  $MR(\mathcal{B}'', SAP_J) \neq \emptyset$  sauf si  $\mathcal{B}'' = \emptyset$ 
  [5] Retourner  $a_j / a_j \in MR(\mathcal{B}'', SAP_J, \mathcal{S})$ ;
Fin

```

Algorithme 4.4 : Sélection de l'action

Dans la suite, les ensembles $NS(\mathcal{B}, SAP_j)$, $MC(\mathcal{B}_K, SAP_j)$, et $MR(\mathcal{B}, SAP_j, S)$ qui apparaissent dans l'Algorithme 4.4, sont détaillés.

4.4.1 Sélection d'actions nécessaires à la viabilité du plan d'action (NS)

L'ensemble des performances dans N , dégradées par le sous plan d'action courant SAP_j et dont la dégradation n'est pas compensée, est noté $N^-(SAP_j)$ et est défini de la façon suivante : $N^-(SAP_j) = \{i \in N : \exists j \in J_i^d / (\delta_{ij}^d \geq \max_{j \in J_i^s} \delta_{ij}^s)\}$.

L'ensemble des actions d'un sous-ensemble \mathcal{B} qui compensent les dégradations générées par SAP_j sur la performance $i \in N$, est noté $NS_i(\mathcal{B}, SAP_j)$ et est défini par : $NS_i(\mathcal{B}, SAP_j) = \{a_j \in \mathcal{B} : \delta_{ij}^s \geq \max_{j \in J_i^d} \delta_{ij}^d\}$.

L'ensemble des actions d'un sous-ensemble \mathcal{B} , qui compensent au moins une dégradation générée par SAP_j , est noté $NS(\mathcal{B}, SAP_j)$ et est défini par :

$$NS(\mathcal{B}, SAP_j) = \bigcup_{i \in N^-(SAP_j)} NS_i(\mathcal{B}, SAP_j) \quad (4.26)$$

Si $NS(\mathcal{B}, SAP_j)$ n'est pas vide, alors la prochaine action est choisie dans cet ensemble : en effet, toutes les dégradations doivent être compensées. Par ailleurs, si l'un des ensembles $NS_i(\mathcal{B}, SAP_j)$ est tel que $|NS_i(\mathcal{B}, SAP_j)| = 1$, alors il existe une et une seule action dans \mathcal{B} capable de compenser les dégradations sur la performance i , la sélection est alors triviale. Lorsque cette action est choisie, la complexité de la recherche sur la branche est alors divisée par 2.

4.4.2 Sélection des actions les plus contraignantes (MC)

L'ensemble des performances de A^* dégradées par une action a_j et non compensée par SAP_j est défini par : $DIS(a_j, SAP_j) = \{i \in A^* : \delta_{ij}^d \geq s_{P_i}(SAP_j)\}$.

L'ensemble des actions d'un sous-ensemble \mathcal{B} qui améliorent une performance i avec un degré supérieur ou égal à α alors que SAP_j ne peut le faire, est noté $IMP_i(\alpha, \mathcal{B}, SAP_j)$ et est défini par : $IMP_i(\alpha, \mathcal{B}, SAP_j) = \{a_j \in \mathcal{B} : (s_{P_i}(SAP_j) < \alpha) \wedge (s_{P_i}(a_j) \geq \alpha)\}$.

L'ensemble des actions d'un sous-ensemble d'actions \mathcal{B}_K qui dégradent au moins une performance dans A^* et pour lesquelles il existe aussi peu que possible d'actions dans \mathcal{B}_K qui pourraient compenser la dégradation, est noté $MC(\mathcal{B}_K, SAP_j)$ et est défini par :

$$MC(\mathcal{B}_K, SAP_J) = \{a_j \in \mathcal{B}_K : DIS(a_j, SAP_J) \cap (\text{Argmin}_{i \in A^*} \min_{k \in K_i^d} |IMP_i(\delta_{ik}^d, \mathcal{B}_K, SAP_J)|) \neq \emptyset\} \quad (4.27)$$

Les actions de $MC(\mathcal{B}_K, SAP_J)$ limiteront autant que possible la prochaine sélection NS et réduiront la complexité de la recherche sur la branche.

4.4.3 Le choix d'action le plus sélectif (MR)

$$MR(\mathcal{B}, SAP_J, \mathcal{S}) = \{Arg \min_{a_j \in \mathcal{B}} |REDUCE(\mathcal{B} \setminus \{a_j\}, SAP_{J \cup \{j\}}, \mathcal{S})|\} \quad (4.28)$$

L'action choisie est celle qui permettra de réduire le problème autant que possible. La fonction $REDUCE$ est maintenant présentée.

4.5 Réduire l'ensemble des actions restantes ($REDUCE$)

La fonction $REDUCE$ vise à éliminer les actions inutiles de l'ensemble des actions restantes dans \mathcal{B} . Chaque fois qu'une action est supprimée de \mathcal{B} , la complexité de la recherche de la branche est divisée par deux. $REDUCE$ est basée sur plusieurs réductions élémentaires qui sont appliquées itérativement (voir l'Algorithme 4.5) et qui sont présentées ci-après. $REDUCE$ nécessite trois paramètres lors de son lancement :

- \mathcal{B} , l'ensemble des actions restant à tester lors de l'exploration de la branche ;
- SAP_J , l'ensemble des actions qui doivent être incluses dans les plans d'action relatifs à la branche testée ($REDUCE$ n'est pas appelée si SAP_J est déjà un plan d'action admissible) ;
- \mathcal{S} , le front de Pareto des solutions déjà identifiées.

4.5.1 Réduction des actions mutuellement exclusives (XCL)

Soit $XCL(\mathcal{B}, SAP_J)$ l'ensemble des actions de \mathcal{B} ($\mathcal{B} \cap SAP_J = \emptyset$) qui sont en conflit avec au moins une action de SAP_J . L'ensemble est défini par :

$$XCL(\mathcal{B}, SAP_J) = \{a_k \in \mathcal{B} : \exists j \in J / a_k \text{ et } a_j \text{ sont mutuellement exclusives}\} \quad (4.29)$$

Par définition des actions mutuellement exclusives, aucune action de $XCL(\mathcal{B}, SAP_J)$ ne peut être ajoutée à SAP_J . Ces actions peuvent donc être retirées de \mathcal{B} sans changer l'ensemble des solutions du front de Pareto.

Il en résulte : $SOLVE(\mathcal{B} \setminus XCL(\mathcal{B}, SAP_J), SAP_J, \mathcal{S}) \Leftrightarrow SOLVE(\mathcal{B}, SAP_J, \mathcal{S})$.

4.5.2 Réduction en fonction du nombre d'actions dans SAP_j

Lemme 4.1 : soit un plan d'action admissible SAP_j qui améliore A^* . Si $|SAP_j| > |A^*|$ alors il existe $K \subset J$ tel que SAP_K est un plan d'action admissible et $|SAP_K| \leq |A^*|$.

Preuve : soit une performance P_i de A^* . L'indice $j \in J$ qui réalise $\max_{j \in J} \delta_{ij}^s$ est noté $j(i)$. Soit $K = \{j(i), i \in A^*\}$. Une action peut produire une amélioration maximale sur plusieurs performances : il peut exister des indices $j \in J$ tel que $|\{i \in A^*, j = j(i)\}| > 1$. Donc, $|SAP_K| \leq |A^*|$.

Comme SAP_j est un plan d'action admissible, alors $\forall i \in A^*, \forall j \in J_i^d : \delta_{ij}^d < \delta_{ij(i)}^s$. Ainsi :

$$\begin{aligned} PM_1 : \min_{j \in K_i^s} \delta_{ij}^s &\geq \min_{j \in J_i^s} \delta_{ij}^s > \max_{j \in J_i^d} \delta_{ij}^d \geq \max_{j \in K_i^d} \delta_{ij}^d \\ PM_2 : \max_{j \in K_i^s} \delta_{ij}^s &= \max_{j \in J_i^s} \delta_{ij}^s > \max_{j \in J_i^d} \delta_{ij}^d \geq \max_{j \in K_i^d} \delta_{ij}^d \end{aligned}$$

D'où SAP_K est un plan d'action admissible pour tout cadre de raisonnement $(PM_{l=1,2}, AF_{k=1,2})$ de la formule (4.16). ■

À partir de ce lemme, on peut conclure que dès que $|SAP_j| = |A^*|$ et que SAP_j n'est pas un plan d'action admissible, il faut réduire l'ensemble des actions restantes \mathcal{B} à l'ensemble vide. Cela signifie que toute branche de plus de $|A^*|$ actions doit être coupée dans l'arbre de recherche.

4.5.3 Réduction des actions bloquantes (LA : *Locking Actions*)

Ce type de réduction est propre aux cadres de raisonnement définis par l'équation (4.16).

L'ensemble des actions bloquantes d'un ensemble \mathcal{B} pour le plan d'action courant SAP_j est noté $LA(\mathcal{B}, SAP_j)$ et est défini par : $LA(\mathcal{B}, SAP_j) = \{a_j \in \mathcal{B} : \exists i \in N / \delta_{ij}^d \geq \max_{a_j \in (\mathcal{B} \cup SAP_j)} \delta_{ij}^s\}$.

Cela signifie qu'une action de $LA(\mathcal{B}, SAP_j)$ dégraderait une performance de N qui ne saurait être compensée par aucune action de \mathcal{B} ou SAP_j . En effet, tout plan d'action contenant une telle action ne sera pas un plan d'action admissible à cause de l'équation (4.16). Les actions bloquantes peuvent être supprimées de \mathcal{B} sans changer l'ensemble du front de Pareto des solutions : $SOLVE(\mathcal{B} \setminus LA(\mathcal{B}, SAP_j), SAP_j, \mathcal{S}) \Leftrightarrow SOLVE(\mathcal{B}, SAP_j, \mathcal{S})$.

4.5.4 Réduction des actions restrictives pour le coût (LC : *Locking Cost*)

L'ensemble des actions d'un ensemble \mathcal{B} , qui ne peuvent être ajoutées à SAP_j sans que le coût global de l'amélioration ne dépasse le budget C_0 alloué, est noté $LC(\mathcal{B}, SAP_j)$ et est défini par : $LC(\mathcal{B}, SAP_j) = \{a_j \in \mathcal{B} : c(SAP_j \cup \{a_j\}) > C_0\}$.

Il en résulte : $SOLVE(\mathcal{B} \setminus LC(\mathcal{B}, SAP_j), SAP_j, \mathcal{S}) \Leftrightarrow SOLVE(\mathcal{B}, SAP_j, \mathcal{S})$.

4.5.5 Réduction des actions incompatibles pour l'admissibilité (INC)

Ce type de réduction est propre aux cadres de raisonnement qui utilisent le modèle de propagation PM_1 de la formule (4.16).

L'ensemble des actions de \mathcal{B}_K qui sont incompatibles avec au moins une action dans SAP_j pour une performance de N est noté $INC(\mathcal{B}_K, SAP_j)$ et est défini par :

$$\begin{aligned} INC(\mathcal{B}_K, SAP_j) = & \{a_k \in \mathcal{B}_K : \exists i \in N / (k \in K_i^s \wedge \exists j \in J_i^d \wedge \delta_{ij}^s \leq \delta_{ik}^d)\} \\ & \cup \{a_k \in \mathcal{B}_K : \exists i \in N / (k \in K_i^d \wedge \exists j \in J_i^s \wedge \delta_{ij}^d \geq \delta_{ik}^s)\} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Dans un cadre de raisonnement utilisant PM_1 , l'ajout d'une action $a_j \in INC(\mathcal{B}, SAP_j)$ au plan d'action courant SAP_j implique que la propriété $PM_1(AP)$ est fausse pour tout plan d'action AP contenant SAP_j et a_j . Par conséquent, $\exists i \in N, s_{p_i}(AP) = 0$, donc $s_{A^*}(AP) = 0$. Ainsi : $SOLVE(\mathcal{B} \setminus INC(\mathcal{B}, SAP_j), SAP_j, \mathcal{S}) \Leftrightarrow SOLVE(\mathcal{B}, SAP_j, \mathcal{S})$.

4.5.6 Réduction des actions restrictives pour l'admissibilité (R)

Ce type de réduction est propre aux cadres de raisonnement qui utilisent l'opérateur d'agrégation AF_2 de l'équation (4.16).

Dans le cas où $SAP_j \neq \emptyset$, la définition de l'ensemble $RA_2(\mathcal{B}_K)$ introduite dans (4.24) (pour le traitement préliminaire) peut être étendue de la façon suivante :

$$RA_2(\mathcal{B}_K, A^*, SAP_j) = \{a_k \in \mathcal{B}_K : (\forall i \in A^*, \delta_{ik}^s < \alpha_0) \wedge (\forall i \in N \setminus A^*, \delta_{ik}^s \leq \min_{j \in (J_i^d \cup K_i^d)} \delta_{ij}^d)\} \quad (4.31)$$

Les actions dans $RA_2(\mathcal{B}_K, A^*, SAP_j)$ forment un ensemble d'actions dites restrictives car elles ne peuvent ni améliorer des performances dans A^* avec un degré supérieur à α_0 ni compenser des dégradations sur $N \setminus A^*$ causées par des actions de \mathcal{B}_K ou SAP_j . Ces actions seront donc supprimées de \mathcal{B}_K .

En fait, la deuxième partie de la définition de $RA_2(\mathcal{B}_K, A^*, SAP_J)$ introduit des relations entre les paramètres internes δ_{ij} sur $N \setminus A^*$. Notons alors que : $(K \subset K') \not\Rightarrow (RA_2(\mathcal{B}_K, A^*, SAP_J) \subset RA_2(\mathcal{B}_{K'}, A^*, SAP_J))$. A chaque fois qu'une action est retirée de \mathcal{B}_K , le nouvel ensemble des actions restantes $\mathcal{B}_{K'}$ peut contenir de nouvelles actions restrictives. C'est pourquoi cette réduction est incluse dans la fonction *REDUCE* car elle doit être appliquée à chaque réduction, au contraire de RA_1 et RC qui sont appliquées une seule fois à l'étape initiale de *SOLVE*. Toutes les actions de $RA_2(\mathcal{B}_K, A^*, SAP_J)$ peuvent être supprimées de \mathcal{B}_K sans que l'ensemble des solutions du front de Pareto en soit changé. Ainsi : $SOLVE(\mathcal{B} \setminus RA_2(\mathcal{B}_K, A^*, SAP_J), SAP_J, \mathcal{S}) \Leftrightarrow SOLVE(\mathcal{B}, SAP_J, \mathcal{S})$.

4.5.7 Réductions de Pareto

Soit un cadre de raisonnement (MP, AF) où l'opérateur d'agrégation est défini par $AF := AF_{i=1,2}$ dans la formule (4.16). Un ordre partiel noté \prec^* sur l'ensemble des parties de \mathcal{A} (i.e., $\mathcal{P}(\mathcal{A})$) est introduit de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \forall SAP_J, SAP_K \in \mathcal{P}(\mathcal{A}) : SAP_J \prec^* SAP_K \Leftrightarrow \\ (\min_{i \in A^* / J_i^S \neq \emptyset} AF(SAP_J) < \min_{i \in A^* / K_i^S \neq \emptyset} AF(SAP_K)) \wedge (c(SAP_J) \geq c(SAP_K)) \vee \\ (\min_{i \in A^* / J_i^S \neq \emptyset} AF(SAP_J) = \min_{i \in A^* / K_i^S \neq \emptyset} AF(SAP_K)) \wedge (c(SAP_J) > c(SAP_K)) \end{aligned} \quad (4.32)$$

Notons que seuls les critères améliorés par le plan d'action sont pris en compte dans l'opérateur \min . Par suite, l'ordre partiel \prec^* est équivalent à l'ordre de Pareto \prec_{Pareto} défini dans la formule (4.23), pour le cas où : $SAP_J, SAP_K \in \mathcal{AP}_{\alpha_0, C_0}(\mathcal{A})$.

- Considérons les cadres de raisonnement utilisant AF_1 comme opérateur d'agrégation.

On suppose que l'on construit un plan d'action SAP_J que l'on veut compléter avec des actions d'un ensemble \mathcal{B} pour obtenir un plan d'action admissible pour A^* . On cherche à montrer que si SAP_J est déjà dominé au sens de \prec^* par un élément s de \mathcal{S} alors on ne pourra pas construire de plan d'action AP_L contenant SAP_J qui soit admissible et qui ne soit pas dominé par s au sens de \prec_{Pareto} en ajoutant des actions de \mathcal{B} .

Soit $PAR_1(\mathcal{B}, A^*, SAP_J, \mathcal{S}) = \{s \in \mathcal{S} : SAP_J \prec^* s\}$.

Si $PAR_1(\mathcal{B}, SAP_J, \mathcal{S}) \neq \emptyset$:

soit AP_L un plan d'action admissible, *i.e.* $AP_L \in \mathcal{AP}_{\alpha_0, c_0}(\mathcal{A})$ et $\min_{i \in A^*/I_i^s \neq \emptyset} AF_1(AP_L) = s_{A^*}(AP_L)$ tel que $SAP_J \subset AP_L \subseteq (SAP_J \cup \mathcal{B})$ ($J \subset L$).

Soit $s_K \in PAR_1(\mathcal{B}, A^*, SAP_J, \mathcal{S})$: s_K un plan d'action admissible alors $s_K \in \mathcal{AP}_{\alpha_0, c_0}(\mathcal{A})$ et $\min_{i \in A^*/K_i^s \neq \emptyset} AF_1(s_K) = s_{A^*}(s_K)$.

$$SAP_J \prec^* s_K \Leftrightarrow \left(\min_{i \in A^*/J_i^s \neq \emptyset} AF(SAP_J) < \min_{i \in A^*/K_i^s \neq \emptyset} AF(s_K) \right) \wedge (c(SAP_J) \geq c(SAP_K)) \vee \left(\min_{i \in A^*/J_i^s \neq \emptyset} AF(SAP_J) = \min_{i \in A^*/K_i^s \neq \emptyset} AF(s_K) \right) \wedge (c(SAP_J) > c(SAP_K))$$

Dans un cadre de raisonnement avec l'opérateur d'agrégation $AF_1 = \min$, on a alors :

$$\left(s_{A^*}(AP_L) \leq \min_{i \in A^*/J_i^s \neq \emptyset} AF(SAP_J) < \min_{i \in A^*/K_i^s \neq \emptyset} AF(s_K) = s_{A^*}(s_K) \right) \wedge (c(SAP_J) \geq c(SAP_K)) \vee \left(s_{A^*}(AP_L) \leq \min_{i \in A^*/J_i^s \neq \emptyset} AF(SAP_J) = \min_{i \in A^*/K_i^s \neq \emptyset} AF(s_K) = s_{A^*}(s_K) \right) \wedge (c(SAP_J) > c(SAP_K))$$

soit:

$$\left((s_{A^*}(AP_L) < s_{A^*}(s_K)) \wedge (c(AP_L) \geq c(s_K)) \right) \vee \left((s_{A^*}(AP_L) \leq s_{A^*}(s_K)) \wedge (c(AP_L) > c(s_K)) \right) \\ \Leftrightarrow AP_L \prec_{Pareto} s_K$$

Par conséquent, aucune action de \mathcal{B} ajoutée à SAP_J ne saurait conduire à une solution non dominée au sens de Pareto : \mathcal{B} peut être réduit à l'ensemble vide. Cela implique : $SOLVE(\mathcal{B}, SAP_J, \mathcal{S}) \Leftrightarrow \mathcal{S}$.

Si $PAR_1(\mathcal{B}, A^*, SAP_J, \mathcal{S}) = \emptyset$: aucune réduction de Pareto ne peut être appliquée.

- Pour les cadres de raisonnement utilisant AF_2 comme opérateur d'agrégation, l'ordre partiel rend les calculs plus compliqués pour les réductions de Pareto pour définir $PAR_2(\mathcal{B}, A^*, SAP_J, \mathcal{S})$, mais la démonstration reste similaire.

4.5.8 Réductions de la borne supérieure d'admissibilité

Soit $MA(\mathcal{B}, A^*, SAP_J)$ l'ensemble des actions de \mathcal{B} qui, ajoutées au plan d'action en construction SAP_J , augmentent le degré d'admissibilité sur au moins une performance de A^* ou bien compensent des dégradations sur $N \setminus A^*$:

$$\begin{aligned}
 MA(\mathcal{B}, SAP_J) = & \\
 \{a_j \in \mathcal{B} : (\exists i \in A^* / s_{P_i}(SAP_{J \cup \{j\}}) > s_{P_i}(SAP_J)) \vee & \\
 (\exists i \in N \setminus A^* / (J_i^d \neq \emptyset) \wedge (s_{P_i}(SAP_{J \cup \{j\}}) > s_{P_i}(SAP_J)))\} &
 \end{aligned}
 \tag{4.33}$$

Si $MA(\mathcal{B}, A^*, SAP_J) = \emptyset$ alors quelle que soit l'action de \mathcal{B} ajoutée à SAP_J aucune performance ne sera améliorée. L'ajout d'actions de \mathcal{B} à SAP_J ne peut conduire à un plan d'action admissible. Par conséquent, $SOLVE(\mathcal{B}, SAP_J, \mathcal{S}) = \mathcal{S}$ si $MA(\mathcal{B}, A^*, SAP_J) = \emptyset$. Dans ce cas, \mathcal{B} peut être réduit à l'ensemble vide.

```

Fonction REDUCE( $\mathcal{B}$  ,  $SAP_J$  ,  $A$  ,  $\mathcal{S}$ ) :  $\rightarrow$  actions
     $\mathcal{B}$  : L'ensemble non-vide des actions restantes
     $SAP_J$  : Le plan d'action courant
     $\mathcal{S}$  : L'ensemble des solutions du Front de Pareto courant
     $\mathcal{X} \leftarrow \emptyset$ 
    Si (  $|J| > |A|$  ) Alors
         $\mathcal{B} \leftarrow \emptyset$ ;
    Sinon
        Tant que (( $\mathcal{B} \neq \mathcal{X}$ )  $\wedge$  ( $\mathcal{B} \neq \emptyset$ )) faire
             $\mathcal{X} \leftarrow \mathcal{B}$ 
             $\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B} \setminus XCL(\mathcal{B}, SAP_J)$ ;
             $\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B} \setminus LA(\mathcal{B}, SAP_J)$ ;
             $\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B} \setminus LC(\mathcal{B}, SAP_J)$ ;
            Si ( cadre utilisant  $PM_1$  ) Alors
                 $\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B} \setminus INC(\mathcal{B}, SAP_J)$ ;
            Fin Si
            Si ( cadre utilisant  $AF_1$  ) Alors
                Si (  $PAR_1(\mathcal{B}, A, SAP_J, \mathcal{S}) \neq \emptyset$  ) Alors
                     $\mathcal{B} \leftarrow \emptyset$ ;
                Fin Si
            Sinon
                Si ( cadre utilisant  $AF_2$  ) Alors
                     $\mathcal{B} \leftarrow \mathcal{B} \setminus RA_2(\mathcal{B}, A, SAP_J)$ ;
                    Si (  $PAR_2(\mathcal{B}, A, SAP_J, \mathcal{S}) \neq \emptyset$  ) Alors
                         $\mathcal{B} \leftarrow \emptyset$ ;
                    Fin Si
                Fin Si
            Fin Si
            Si (  $MA(\mathcal{B}, A, SAP_J) = \emptyset$  ) Alors
                 $\mathcal{B} \leftarrow \emptyset$ ;
            Fin Si
        Fait
    Fin Si
    Retourner  $\mathcal{B}$ 
Fin
    
```

Algorithme 4.5 : Réduction de l'ensemble des actions restantes à tester

4.6 Terminaison, complétude et consistance

L'ensemble des plans d'action obtenus en utilisant cette représentation sous forme d'arbre binaire (voir Figure 4.3) est isomorphe à $\mathcal{P}(\mathcal{A})$. Ainsi, sa taille est $2^{|\mathcal{A}|}$. Cela signifie que tous les plans d'action sont accessibles. Comme l'espace de recherche est fini et qu'il est basiquement exploré en profondeur d'abord, on peut en déduire que tous les plans d'action admissibles sont atteignables en un temps fini. Ainsi, les propriétés de terminaison, de complétude et de consistance sont évidentes si la phase de *réduction* n'est pas intégrée.

L'ordre dans lequel les actions sont sélectionnées n'a aucune influence sur les propriétés de terminaison, de complétude et de consistance de l'algorithme. En revanche, couper des branches (la fonction *REDUCE* de l'Algorithme 4.2 ou lorsqu'une solution est trouvée) dans la représentation de l'espace de recherche est susceptible d'affecter la complétude de l'algorithme. Ainsi, la seule propriété restant à vérifier est la complétude de l'algorithme lorsque l'on coupe des branches : les réductions ne doivent pas éliminer des solutions (plans d'action admissibles) pour garantir la propriété de la complétude.

Théorème 4.1 : Toutes les réductions effectuées sur les actions dans l'Algorithme 4.2 n'affectent pas sa complétude.

Preuve : soit \mathcal{B} l'ensemble des actions restant à tester, SAP_j le sous plan d'action en cours et \mathcal{S} l'ensemble des solutions de Front de Pareto en cours. Les réductions interviennent à deux niveaux :

- soit SAP_j n'est pas admissible ou le cadre de raisonnement utilise AF_2 . Dans ce cas, quelles que soient les actions \mathcal{A} supprimées de \mathcal{B} à cause d'une des réductions utilisée dans l'Algorithme 4.5, nous avons montré que $\forall \mathcal{A}: SOLVE(\mathcal{B} \setminus \mathcal{A}, SAP_j, \mathcal{S}) = SOLVE(\mathcal{B}, SAP_j, \mathcal{S})$. Les réductions n'affectent pas le front de Pareto ;
- soit SAP_j est admissible et le cadre de raisonnement utilise AF_1 . Dans un cadre de raisonnement utilisant AF_1 , tout plan d'action qui contiendrait SAP_j construit à partir des actions restantes de \mathcal{B} est dominé par SAP_j (l'admissibilité ne peut que diminuer et le coût augmenter). Les réductions n'affectent pas le front de Pareto. ■

5. Discussion

Dans ce chapitre, nous avons présenté comment l'amélioration d'un système complexe peut être réalisée en prenant en compte, d'une part les attentes des dirigeants et d'autre part, les contraintes des opérationnels. Le modèle MAUT discuté dans la section 3 permet de

synthétiser les préférences des dirigeants et d'identifier ainsi les performances élémentaires qu'ils souhaiteraient voir améliorer en priorité. Les préférences du manager synthétisées sous une forme analytique par un opérateur d'agrégation permettent de concevoir la recherche des performances stratégiques comme un problème d'optimisation multi objectifs.

Le modèle MAUT ne saurait prendre en compte les contraintes opérationnelles, il doit donc être complété par un modèle comportemental du système dont on cherche à améliorer la sécurité. Dans notre cas, nous avons choisi de le représenter sous la forme d'un modèle de relations qualitatives entre les objectifs et les paramètres d'action. La recherche de plans d'action efficaces prend alors la forme d'un problème d'optimisation combinatoire.

Le modèle comportemental qualitatif permet d'identifier les actions les plus pertinentes pour améliorer le plus sûrement les performances désignées par l'équipe dirigeante, mais il ne permet pas de prédire le gain quantitatif de ces performances. Par conséquent, l'amélioration exigera plusieurs itérations avant que le niveau global de sécurité souhaité ne soit atteint. Nous avons expliqué comment les modèles comportemental et préférentiel devaient être utilisés conjointement dans une procédure itérative pour la conception d'une amélioration efficace de la sécurité d'un système.

Cette approche a été implémentée dans notre SIADG et les fonctionnalités associées contribuent à limiter l'erreur humaine dans le processus de décision (une illustration est présentée à la fin du Chapitre 5). La procédure itérative d'amélioration qui distingue, la détermination des dimensions de la performance les plus pertinentes à améliorer, de l'identification des paramètres à actionner pour modifier les caractéristiques souhaitées, a pour objectif d'accompagner dirigeants et opérationnels dans la conception du projet d'amélioration et de réduire ainsi les erreurs d'exécution et les erreurs de coordination entre stratégies et exécutants. Parce que les agents sont supposés être collaboratifs dans ce chapitre, la démarche d'amélioration peut être formulée sous la forme d'un problème d'optimisation multi objectifs global guidé par un critère d'efficacité, les erreurs de coordination s'en trouvent limitées. La procédure itérative d'amélioration permet de gérer la concordance entre les objectifs et les capacités de l'industriel, d'identifier des objectifs atteignables et d'adapter ainsi la démarche d'amélioration dans le temps, elle contribue à réduire les erreurs d'intégration et d'anticipation.

Nous nous sommes efforcés ici de distinguer les phases de conception du projet d'amélioration basées sur chacun des deux modèles. Il peut arriver que la procédure itérative d'amélioration ne converge pas. On peut alors reprocher à l'équipe dirigeante de définir des objectifs non atteignables ou encore aux équipes opérationnelles d'être inefficaces... La notion de performance est finalement la connaissance partagée par les deux mondes : elle est utilisée ici comme la référence nécessaire pour définir un consensus raisonné entre stratégie et capacité. Notons que l'impossibilité d'atteindre les objectifs exigés par l'équipe dirigeante peut aussi servir à révéler une déficience dans la palette des contrôles disponibles sur le système, un moyen de remettre en question la politique sécuritaire de l'industriel par exemple et de faire émerger de nouvelles alternatives.

Chapitre 5. Amélioration multicritère d'options : pilotage de la négociation dans l'hypothèse coopérative

1. Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que pour satisfaire aux normes institutionnelles évolutives et aux exigences croissantes des clients en termes de sécurité, les industriels de secteurs d'activités à risques doivent sans cesse améliorer leurs outils de production et leurs installations. Pour suivre une telle politique d'amélioration, ils doivent d'une part identifier les dimensions stratégiques qu'il faut faire progresser pour espérer un gain de performance maximal, et d'autre part identifier quels paramètres doivent être modifiés pour atteindre les caractéristiques attendues du nouveau système plus sécuritaire.

Dans le Chapitre 4, ce problème d'amélioration multicritère a été modélisé sous la forme d'une optimisation multi objectifs. L'approche qui y est proposée se base sur le modèle qualitatif des relations entre les paramètres et les performances. Chaque département impliqué dans la démarche d'amélioration connaît partiellement ce modèle. L'hypothèse de *collaboration* du Chapitre 4 signifie que les départements impliqués dans le processus d'amélioration partagent leurs connaissances partielles sur le modèle qualitatif afin que tous aient la connaissance complète du modèle avant d'engager l'action collective. Or, cette hypothèse n'est pas toujours valide, les chefs de départements ne sont pas toujours prêts à partager les connaissances du modèle propre à leur département. En revanche, ils sont prêts à *coopérer* pour construire une solution commune.

Ce chapitre propose une approche originale (Imoussaten, Troussset and Montmain, 2011b) de cette problématique sous la forme d'un modèle de négociation argumentée entre les départements pour identifier collectivement un plan d'action pertinent qui fournit l'amélioration attendue des performances sous les contraintes d'admissibilité et de budget. Cette approche est basée sur la théorie de l'argumentation.

Cependant, le problème résolu dans ce chapitre n'est pas complètement équivalent au précédent. En effet, plusieurs départements sont, en général, responsables de groupes d'actions d'amélioration. Ils doivent coopérer pour atteindre les objectifs d'amélioration. Le problème est d'autant plus difficile qu'un département ne connaît pas nécessairement les capacités des autres. Les interactions entre les départements peuvent être altérées par des intérêts personnels et antagonistes et la coordination peut souffrir d'un manque de communication. Les conflits d'intérêts peuvent apparaître et la coopération peut se transformer en concurrence. Un suivi efficace du travail collectif nécessite, entre autres, que les objectifs et les fonctions de communication entre les départements soient clairement établis (échange de la connaissance utilisable) et que la clé de la dynamique de groupe soit élucidée (identification des objectifs personnels et collectifs). Au lieu d'un problème d'optimisation combinatoire global, la conception d'un projet d'amélioration collective apparaît, ainsi, comme une décision d'organisation. Les échanges de connaissances utiles à

l'action sont filtrés par des contraintes organisationnelles, car les objectifs collectifs et personnels peuvent apparaître indistinctement mêlés.

Le pilotage de la négociation argumentée doit veiller d'une part, à ce que l'objectif collectif de l'amélioration soit atteint et d'autre part, que les intérêts individuels soient équitablement satisfaits. Ce double objectif permet de réduire les erreurs de coordination qui pourraient se produire dans un débat non contrôlé. La gestion de l'apprentissage dynamique par le collectif du modèle qualitatif utile à la décision permet de limiter les erreurs d'évaluation.

Le plan de ce chapitre est le suivant. La section 2 propose des rappels sur les travaux relatifs à nos problématiques : une comparaison entre l'approche collaborative et l'approche coopérative et le cadre d'argumentation théorique de Dung. L'approche de modélisation de débat entre départements est présentée dans la section 4. Cette section montre aussi les avantages et les inconvénients de cette nouvelle approche. La section 5 présente une illustration de l'approche proposée sur un exemple aussi traité par l'approche collaborative.

2. Contexte de l'approche

2.1 Approche collaborative vs approche coopérative

Ce chapitre, dans la continuité de celui qui le précède, s'intéresse aux décisions relatives à la mise en œuvre d'une amélioration sur un système complexe, autrement dit au choix des actions qui sont supposées répondre aux objectifs fixés par la direction. Comme nous l'avons mentionné au Chapitre 4, pour mener au mieux ce projet collectif, il faudrait considérer que les opérationnels ou départements collaborent et construisent a priori le référentiel de connaissances utiles à la décision, ce qui revient à mettre en commun toutes leurs connaissances sur l'installation avant d'engager une action collective. C'est un modèle de décision d'organisation où la planification conserve encore une place privilégiée : la recherche du meilleur plan d'action est vue comme un problème d'optimisation multi objectifs global (Imoussaten et al., 2011a). Cependant cette approche n'est pas souvent réalisable en pratique. Il semble plus naturel de considérer que les équipes vont davantage coopérer que collaborer. Le terme de « travail coopératif » est employé lorsque plusieurs personnes travaillent conjointement dans un même objectif, chacun ayant à sa charge une part bien définie du travail à réaliser. Le mode coopératif résulte d'une division négociée (rationalisée) a priori d'une tâche en actions qui seront attribuées (réparties) entre des individus qui vont agir de façon autonome. Les interactions se limitent généralement à l'organisation, la coordination et le suivi de l'avancement (souvent sous la responsabilité d'un individu chargé de s'assurer de la performance individuelle de chacun). La responsabilité de chacun est limitée à garantir la réalisation des actions qui lui incombent : c'est la concaténation progressive et coordonnée du fruit de l'action de chacun qui permet d'atteindre l'objectif. Le référentiel opératif—le modèle—se construit alors au fur et à mesure que l'action prend forme : chaque membre du groupe apporte sa contribution lorsqu'il juge son intervention ou sa connaissance nécessaire, il n'y a pas d'organisation de la connaissance et

de l'action a priori, l'une et l'autre se construisent parallèlement et dynamiquement. On abandonne alors toute idée de planification a priori qui subsiste encore dans la vision de la décision en organisation vue par Simon, pour s'orienter vers une construction de l'action dynamique plus proche de la vision de la décision en organisation de March et Suchman (March, 1991).

L'une des caractéristiques des décisions organisationnelles est de chercher une solution satisfaisante raisonnable en dépit du processus de filtrage d'information par l'organisation. Cette caractéristique est à l'origine de la notion de rationalité limitée des décideurs : les limites de la connaissance des faits et des hypothèses dans les décisions sont dues aux contraintes de l'organisation, qui sélectionne ou favorise certains scénarios en fonction de ses propres intérêts (Simon, 1997). La modélisation de la conception d'un projet d'amélioration comme un problème d'optimisation multi-objectif global apparaît ainsi comme une hypothèse irréaliste du point de vue de Simon parce que les contraintes du problème ne sont pas connues a priori et doivent être progressivement apprises par les agents.

Les agents échangent des arguments et négocient la façon dont les actions seront distribuées (ou comment le budget du projet sera partagé). La prise de décision est un processus: il est construit, négocié et suit un parcours sinueux au fil du temps (Paschetta and Tsoukiàs, 2000) (Roy, 2004). Le processus décisionnel est modélisé comme une négociation argumentée dans le cadre de la théorie de l'argumentation dont les éléments nécessaires à notre approche sont rappelés dans la section suivante (Amgoud and Prade, 2009) (Dung, 1995).

2.2 La théorie d'argumentation

Dung (Dung, 1995) fournit un cadre d'argumentation théorique pour l'acceptabilité des arguments et montre le rôle fondamental que cette théorie peut jouer dans les investigations sur la structure logique de nombreux problèmes sociaux et économiques. Certaines définitions sont rappelées dans la présente section.

Définition 5.1 : Un cadre d'argumentation est une paire $AF = \langle \mathcal{G}, \mathcal{R} \rangle$ où \mathcal{G} est un ensemble d'arguments et $\mathcal{R} \subset \mathcal{G} \times \mathcal{G}$ est une relation d'attaque. Un argument \arg_1 attaque un argument \arg_2 ssi $(\arg_1, \arg_2) \in \mathcal{R}$. Par extension, un ensemble d'arguments S attaque un argument \arg si \arg est attaqué par au moins un élément de S .

Remarque 5.1 : La notation AF rappelle l'appellation en anglais du « cadre d'argumentation » : *Argumentation Framework*.

En analysant la relation d'attaque, le but est de trouver un sous-ensemble d'arguments qui l'emportent dans une décision controversée, à savoir un sous-ensemble d'arguments qui soient consistants et robustes contre les attaques. Un tel ensemble est appelé une extension. Plusieurs extensions peuvent être envisagées (Dung, 1995). Quelques définitions nécessaires à notre étude sont fournies dans la suite (Dung, 1995).

Définition 5.2 : Un ensemble d'arguments S est dit être *sans conflits* s'il ne contient pas d'éléments $\arg_1, \arg_2 \in S$ tels que $(\arg_1, \arg_2) \in \mathcal{R}$.

Définition 5.3 :

(1) un argument $\arg_1 \in \mathcal{G}$ est *acceptable* par rapport à un ensemble d'arguments S ssi pour chaque argument $\arg_2 \in AF$: si $(\arg_2, \arg_1) \in \mathcal{R}$ alors \arg_2 est attaqué par S .

(2) un ensemble d'arguments sans conflits S est admissible ssi chaque argument dans S est acceptable par rapport à S .

Définition 5.4 : une *extension préférée* d'un cadre d'argumentation AF est un ensemble d'arguments admissible maximal (dans le sens de l'inclusion) dans AF .

3. Le modèle de débat entre les départements

Dans notre problématique d'amélioration d'un système complexe par un collectif d'acteurs, la vision de la construction dynamique de l'action laisse envisager une représentation des membres du groupe comme des agents autonomes qui coopèrent pour atteindre les objectifs arrêtés par la direction. Nous avons décliné un modèle sur ce mode de fonctionnement du collectif basé sur la théorie de l'argumentation pour modéliser une négociation argumentée (Imoussaten, Troussel and Montmain, 2011b). Les agents ne sont autres que les départements (représentés par le responsable) ou services de l'entreprise. Généralement, les actions à réaliser pour améliorer le système sont réparties sur plusieurs départements de l'entreprise. Par conséquent, les départements doivent engager des négociations pour répartir la responsabilité des actions et la part du budget accordée par la direction. Des conflits d'intérêt peuvent alors émerger bien que les départements restent dans une logique de coopération. Cette section a pour objet de présenter un modèle d'argumentation basé sur la théorie de l'argumentation de Dung (Dung, 1995) pour la recherche commune d'un plan d'action d'amélioration.

L'instanciation du cadre d'argumentation théorique de Dung à notre problématique (*i.e.*, la formulation homogène des arguments et l'énoncé d'une relation d'attaque entre ces arguments utiles à la construction collective d'un plan d'action) a le mérite de développer un système d'argumentation qui laisse envisager sereinement un passage à l'échelle avec un nombre conséquent d'arguments de décision.

Les départements sont considérés comme des agents coopératifs : ils font leur possible pour atteindre les objectifs collectifs, mais ils ont aussi des intérêts personnels dans le projet. Plus un département reçoit d'actions à réaliser, plus la part du budget qui lui échoit est grande. Lorsqu'un département propose ses actions, il fonde sa proposition sur sa connaissance des relations entre ses actions et les objectifs qu'il prétend atteindre. Une négociation argumentée

débuter donc, jusqu'à ce que toutes les performances soient améliorées à un coût global inférieur à la limite allouée.

La répartition des actions par département induit quelques notations supplémentaires par rapport au Chapitre 4. A^* est le sous-ensemble de performances à améliorer et B le budget maximal alloué par la direction. Un groupe de M départements (ou managers) $\{m_1, \dots, m_i, \dots, m_M\}$ doit déterminer quel est le sous-ensemble d'actions, *i.e.*, un *plan d'action*, qui doit être effectué pour satisfaire les objectifs dans A^* sous les contraintes financières B . Chaque agent m_i est un département qui est en charge d'un sous-ensemble d'actions $\{a_1, \dots, a_{p_i}\}$ noté $\mathcal{A}(m_i)$. Une action $a_j \in \mathcal{A}(m_i)$ peut avoir un impact négatif sur un sous-ensemble de performances de A^* , mais elle peut aussi avoir un impact négatif sur d'autres performances (voir la section 3.2 du Chapitre 4). La recherche dynamique d'un plan d'action doit gérer de tels conflits.

Nous allons utiliser, dans la suite, la notation SAP_j (ou $SAP_j(t)$), quand SAP_j change avec le temps ou SAP quand il n'est pas nécessaire de mentionner les indices des actions dans SAP pour désigner le plan d'action commun en construction par tous les départements et la notation $AP_j^{m_i}$ (ou $AP_j^{m_i}(t)$) pour désigner une proposition d'actions du département m_i .

L'amélioration de critères dans A^* est le but commun de tous les départements. Cependant, chacun d'eux a un intérêt financier dans le projet d'amélioration. En effet, plus il y a d'actions de m_i dans le plan d'action, plus grand est le pourcentage de B qui revient au département m_i . La part du budget B pour le département m_i si ses propositions ($AP_j^{m_i}$) sont acceptées dans le plan d'action commun finale SAP_j est donnée par la formule suivante :

$$\sum_{a_j \in \mathcal{A}(m_i) \cap SAP_j} c(a_j) \text{ où } c(a_j) \text{ est le coût de l'action } a_j.$$

La démarche méthodologique pour la mise en place de la solution proposée est la suivante :

- Adaptation du modèle qualitatif des relations entre actions et performances pour l'hypothèse coopérative (apprentissage dynamique) ;
- Représentation des connaissances et des préférences des départements : les bases de connaissance des agents (départements), les arguments de décision qui proposent des plans d'action partiels (*i.e.*, améliorant un sous-ensemble des objectifs) pour contribuer à l'amélioration du projet et le gain associé à ces plans d'action partiels ;
- Organisation d'un débat entre les départements pour la recherche de plans d'action en utilisant la théorie de l'argumentation : les relations d'attaque, la révision des connaissances ;
- Définition des stratégies individuelles et communes des départements pour l'organisation du débat (choix des arguments) ;
- Etude de la cohérence du cadre d'argumentation proposé : un cadre d'argumentation cohérent est conçu et son extension stable est l'ensemble des arguments dont les

actions associées forment un sous-ensemble d'actions améliorant toutes les performances de A^* .

3.1 Le modèle qualitatif pour les relations entre actions et performances adapté à l'hypothèse coopérative

Cette section reprend les notations de la section 3.2 du Chapitre 4 pour le modèle des relations entre les actions et les performances.

Tout d'abord, l'ensemble des actions potentielles, noté $\mathcal{A} = \{a_1, \dots, a_p\}$, contient les actions de tous les départements, *i.e.*, $\mathcal{A} = \bigcup_{l=1..M} \mathcal{A}(m_l)$ et $(\mathcal{A}(m_l))_{l=1..M}$ est une partition de \mathcal{A} . Les performances relatives aux critères de A^* sont notées $P_i, i=1..n$. Pour chaque performance (les notions de performance P_i et d'indice i sont équivalentes et indifféremment utilisées dans la suite). La notation δ_{ij}^* est utilisée lorsqu'il n'est pas nécessaire de préciser si l'impact est positif, *i.e.*, $* = s$, ou négatif, *i.e.*, $* = d$.

La section 3.3 du chapitre 4 a présenté des cadres de raisonnement pour évaluer les plans d'action en fonction du modèle qualitatif considéré. Dans ce chapitre, nous nous sommes limités à un cadre de raisonnement unique qui correspond à l'attitude pessimiste pour calculer l'impact global d'un plan d'action. Ce cadre de raisonnement exprime clairement une aversion au risque.

Soit $AP_J = \{a_j : j \in J\} \subseteq \mathcal{A}(m_l)$, où $J \subseteq \{1, \dots, p\}$, un plan d'action d'un département m_l . Nous rappelons que l'attitude pessimiste correspond à un modèle de propagation « *min/max* » et un opérateur d'agrégation « *min* ». Pour cette attitude, le degré d'impact du plan d'action AP_J par rapport à la performance P_i , est calculé de la façon suivante :

$$s_{P_i}(AP_J) = \begin{cases} \min_{j \in J_i^s} \delta_{ij}^s & \text{si } \min_{j \in J_i^s} \delta_{ij}^s > \max_{j \in J_i^d} \delta_{ij}^d \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.1)$$

A partir de la formule (5.1), nous pouvons déduire que selon les degrés d'impacts positifs ou négatifs des actions sur la performance P_i , le plan d'action AP_J peut induire un impact nul ou strictement positif sur P_i . Nous introduisons la définition d'*incompatibilité* suivante qui explique pourquoi l'impact d'un plan d'action sur une performance peut être nul :

Définition 5.5 - Actions incompatibles : deux actions a_j et $a_{j'}$ sont *incompatibles* par rapport à une performance P_i si le degré d'impact positif de a_j (resp. $a_{j'}$) sur i est inférieur au degré d'impact négatif de a_j (resp. $a_{j'}$) sur P_i .

Corollaire 5.1 : Si deux actions a_j et $a_{j'}$ sont *incompatibles* par rapport à une performance P_i et appartiennent au même plan d'action AP_J , alors $s_{P_i}(AP_J) = 0$.

Un plan d'action appartenant à un seul département ne contient généralement pas d'actions ayant des degrés d'impacts positifs sur l'ensemble des performances de A^* . C'est pour cette raison que nous introduisons la définition suivante de l'admissibilité (ou degré d'impact) par rapport à un sous-ensemble de performances A de A^* :

Définition 5.6 : Un sous-ensemble d'actions d'amélioration ou plan d'action partiel AP_J est α -admissible par rapport à un sous-ensemble non vide de performances $A \subseteq A^*$ s'il améliore toutes les performances de A au moins avec le degré α , et il n'existe pas d'actions incompatibles dans AP_J par rapport aux performances de $A \setminus A^*$ et $\sum_{j \in J} c(a_j) \leq B$ (pour rappel, B est le budget maximal alloué et $c(a_j)$ est le coût de l'action a_j). Le degré d'admissibilité de AP_J par rapport à A est défini par :

$$s_A(AP_J) = \begin{cases} \min_{i \in A} s_{P_i}(AP_J) & \text{si} \\ \forall i \in (A^* \setminus A), (J_i^d \neq \emptyset \Rightarrow s_{P_i}(AP_J) > 0) & \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.2)$$

Plus généralement, AP_J est dit admissible s'il existe $\alpha \in]0,1]$ tel que AP_J est α -admissible par rapport à A^* . La condition $(J_i^d \neq \emptyset \Rightarrow s_{P_i}(AP_J) > 0)$ pour toutes performances P_i de $A^* \setminus A$ veut simplement dire que l'amélioration (impact positif) des performances dans A^* ne doit pas impliquer de dégradations (impact négatif) dans $A^* \setminus A$, et quand une action $a_j \in AP_J$ a un impact négatif sur une performance dans $A^* \setminus A$ alors il doit nécessairement exister une action compensatrice $a_{j'} \in AP_J$ telle que $\delta_{ij'}^s > \delta_{ij}^d$, sinon $s_A(AP_J) = 0$.

Les départements doivent produire un plan d'action qui doit avoir une admissibilité supérieure à un seuil $\alpha_0 \in]0,1]$ fixé par la direction. Comme un plan d'actions d'amélioration construit collectivement par les départements doit être α_0 -admissible (son degré d'impact doit être supérieur ou égal à un degré α_0) et son coût doit être inférieur au budget maximal alloué B , il est évident que chaque proposition (sous-ensemble d'actions) d'un département ne doit contenir ni actions restreignantes par rapport à l'admissibilité et au coût ni actions bloquantes (voir les sections 4.5.3 et 4.5.4 du Chapitre 4). Il est à noter qu'une action bloquante ne peut être diagnostiquée par le département qui la détient, seul : tous les départements doivent mentionner qu'ils sont incapables de compenser la dégradation d'une telle action. Pour savoir si un sous-ensemble d'actions d'un département peut être ajouté au plan d'action en

construction commun à tous les départements, nous introduisons la notion de *consistance* suivante :

Définition 5.7 : Un sous-ensemble d'actions d'amélioration AP_{J_1} est *consistant* avec un plan d'action SAP_{J_2} (déjà construit) qui est α -admissible par rapport à $A \subset A^*$ si $AP_{J_1} \cup SAP_{J_2}$ est un plan d'action α -admissible par rapport à un ensemble de performances $A' \supset A$.

3.2 Connaissances et préférences des départements

L'organisation d'un débat entre les départements nécessite une représentation de leurs connaissances et de leurs préférences. A partir de leurs connaissances les départements construisent des arguments pour défendre leurs préférences. La représentation des connaissances des départements est basée sur le modèle qualitatif des relations entre actions et performances et leurs préférences sont basées sur le gain que peut leur apporter leur contribution au projet d'amélioration.

3.2.1 Connaissances des départements

Les connaissances de chaque département sont représentées de la façon suivante : un élément de connaissance φ est assimilé à une règle qui inclut nécessairement une action, les performances sur lesquelles cette action a un impact, le signe de l'impact (« - » pour un impact négatif ou « + » pour impact positif) et la valeur exacte ou estimée du degré de cet impact. En effet, si l'action appartient à $\mathcal{A}(m_i)$ alors le département m_i connaît le degré d'impact exact de ses propres actions (les valeurs δ_{ij}^*). Par exemple, le département de production prétend que la maintenance prédictive améliore *faiblement, significativement, fortement* le taux des rejets : l'impact espéré est qualitatif mais garanti par le département. En revanche, si l'action n'appartient pas à $\mathcal{A}(m_i)$, on suppose qu'en pratique un département ne connaît pas le potentiel des autres départements. Par exemple, le département marketing ignore que la production est passée d'une maintenance « préventive systématique » à une maintenance « préventive selon état », cependant cela n'empêche pas les deux départements de mener à bien leurs tâches respectives. Dans ce dernier cas, m_i doit estimer la valeur de l'impact de telle ou telle action de m_i à partir des arguments échangés durant le débat.

La base de connaissances d'un département m_i est notée \mathcal{K}_i . Initialement, cette base contient uniquement les règles propres aux actions de $\mathcal{A}(m_i)$. La base \mathcal{K}_i évolue en fonction du temps selon la progression du débat et le plan d'action courant construit SAP : le département m_i apprend, à partir de la délibération, les bornes inférieure et supérieure des valeurs de δ_{ij}^* , pour chaque action $a_j \in SAP \cap \mathcal{A}(m_{i \neq j})$. Le département m_i doit réviser sa base \mathcal{K}_i chaque fois qu'un argument est échangé, i.e., que de nouvelles actions sont

proposées ou des actions sont retirées de SAP . Ainsi, la base \mathcal{K}_l du département m_l est l'ensemble des connaissances φ qui peuvent être énoncées comme suit :

- $\varphi =: a_j \wedge (a_j \xrightarrow[\substack{+ \\ \lambda_{ij}^s(l)}]{\substack{\lambda_{ij}^s(l)}} P_i)$, i.e., a_j a un impact positif sur P_i de degré $\delta_{ij}^s(l) \geq \lambda_{ij}^s(l)$ quand $a_j \in \mathcal{A}(m_{l \neq i})$ (voir la révision des connaissances dans la section 3.3.4) ; avec un degré $\delta_{ij}^s(l) = \lambda_{ij}^s(l)$ quand $a_j \in \mathcal{A}(m_l)$;
- $\varphi =: a_j \wedge (a_j \xrightarrow[\substack{- \\ \lambda_{ij}^d(l)}]{\substack{\lambda_{ij}^d(l)}} P_i)$, i.e., a_j dégrade P_i avec un degré $\delta_{ij}^d(l) \leq \lambda_{ij}^d(l)$ quand $a_j \in \mathcal{A}(m_{l \neq i})$; avec un degré $\delta_{ij}^d(l) = \lambda_{ij}^d(l)$ quand $a_j \in \mathcal{A}(m_l)$.

En d'autres termes, chaque département est censé connaître la structure du digraphe liée à chaque action dès qu'elle est proposée dans le débat. Toutefois, il ne connaît pas nécessairement l'impact exact des actions des autres départements dans le plan d'action courant (i.e., les valeurs exactes des paramètres du graphe pour $a_j \in \mathcal{A}(m_{l \neq i})$). Au cours du débat, la connaissance des départements évolue : les arguments qui sont échangés peuvent rendre l'identification des gains de la relation action-performance progressivement plus précise. Chaque département apprend de la discussion.

3.2.2 Arguments des départements

Seuls les arguments de décision sont considérés dans cette approche, i.e., des connaissances qui contiennent une décision (actions) dans les prémisses et dont la conclusion est nécessairement un objectif (performances de A^*).

Un argument est l'ensemble des règles $\{\varphi =: a_j \wedge (a_j \xrightarrow[\substack{\pm \\ \delta_{ij}^*}]{\substack{\delta_{ij}^*}} P_i); j \in J, i \in A \subseteq A^*\}$ qui supportent la proposition des actions de AP_j améliorant les performances de $A \subseteq A^*$.

Définition 5.8 : Soit SAP le sous-ensemble d'actions d'amélioration (α -admissible relatif aux critères d'un sous ensemble de performances A de A^*) construit par le collectif auparavant. Un argument arg énoncé par m_l est dit consistant avec les arguments qui ont permis de construire SAP si le sous-ensemble d'actions d'amélioration $AP_j \subseteq \mathcal{A}(m_l)$ associé à arg est consistant (cf. Définition 5.7) avec SAP .

Un argument consistant peut alors s'énoncer sous la forme synthétique :

$$arg =: \langle AP_j \wedge (SAP \cup AP_j \xrightarrow[\substack{+ \\ \alpha}]{\substack{\alpha}} A' \supset A) \rangle.$$

Exemple 5.1 : Soit l'ensemble des performances à améliorer $A^* = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$, et $SAP = \{a_1, a_2, a_3\}$ le sous-ensemble d'actions d'amélioration construit par les départements à

une étape du processus, et qui améliore le sous-ensemble de performances $A = \{P_1, P_2\} \subset A^*$ avec le degré d'admissibilité $\alpha = 0.6$ (voir la Figure 5.1).

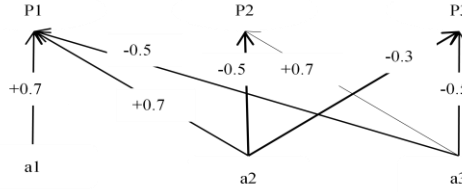


Figure 5.1 : Exemple d'un plan d'action partiel

La Figure 5.1 montre l'impact de SAP . Un département m_l peut alors proposer un argument (un sous-ensemble d'arcs sur la figure) $\arg = \langle AP_j \wedge (SAP \cup AP_j \xrightarrow[\alpha]{+} A') \rangle$, où $AP_j = \{a_4\}$ est consistant avec SAP . Le nouveau plan d'action construit améliore le sous-ensemble de performances $A' = \{P_1, P_2, P_3\}$ et les connaissances élémentaires associées à \arg sont :

$$\varphi = a_4 \wedge (a_4 \xrightarrow[\alpha]{+} P_3), \quad \varphi = a_4 \wedge (a_4 \xrightarrow[\alpha]{-} P_4).$$

3.2.3 Les préférences des départements

Pour chaque département m_l , la notation G_l^{\max} est utilisée pour désigner son gain espéré maximal : $G_l^{\max} = \sum_{a \in \mathcal{A}(m_l)} c(a)$.

Soit $SAP(t)$ le sous-ensemble d'actions d'amélioration construit à l'instant t . Le gain individuel du département m_l connaissant $SAP(t)$, noté $G_l(SAP(t))$, est donné par :

$$G_l(SAP(t)) = \sum_{a \in (SAP(t) \cap \mathcal{A}(m_l))} c(a).$$

La quantité $G_l^{\max} - G_l(SAP(t))$ représente alors la perte de gain pour le département m_l par rapport à la proposition $SAP(t)$. Pour des raisons d'homogénéité entre la perte de tous les départements, la formule suivante définissant la perte de gain relative de m_l par rapport $SAP(t)$, noté $r(l, SAP(t))$ est préférée à $G_l^{\max} - G_l(SAP(t))$:

$$r(l, SAP(t)) = (G_l^{\max} - G_l(SAP(t))) / G_l^{\max} \quad (5.3)$$

L'objectif de chaque département est de minimiser la quantité $r(l, SAP(t))$.

3.3 La structure du débat

Une fois les connaissances des agents et leurs préférences identifiées et sachant la forme prise par les arguments, il est maintenant possible de modéliser le débat relatif à la construction collective d'un plan d'action admissible qui améliorera toutes les performances de A^* . Le modèle du débat est détaillé dans cette section.

3.3.1 Le principe général

Une fois que tous les départements connaissent le budget B accordé par la direction pour le projet d'amélioration et le degré d'admissibilité α_0 exigé, un département propose certaines de ses actions pour améliorer un sous-ensemble des performances de A^* et ainsi contribuer à l'objectif collectif d'amélioration. Néanmoins, ces actions peuvent dégrader d'autres performances. Les autres départements vont tenter de compenser ces dégradations éventuelles et de compléter l'amélioration des critères de A^* . Il arrive que des actions déjà introduites dans la solution commune ne puissent être compensées et bloquent la progression de la construction. Le mécanisme d'argumentation permet de débloquent cette situation et d'éliminer ce genre d'actions. Chaque fois que des actions supplémentaires sont proposées ou éliminées, les départements doivent mettre à jour leurs bases de connaissances.

Nous allons noter $S^{m_i}(t) = \{AP_j^{m_i}(t) : AP_j^{m_i}(t) \text{ est consistant avec } SAP(t-1)\}$, l'ensemble des arguments consistants d'un département m_i quand le plan d'action commun $SAP(t-1)$ est construit.

L'organisation du débat est composée des étapes suivantes :

- Chaque département calcule l'ensemble de ses arguments $S^{m_i}(t)$ ($t > 0$), et adopte une stratégie appropriée (voir la sous section 3.3.2-b) pour faire une seule proposition $AP_j^{m_i}(t)$ parmi ses arguments afin de maximiser son gain lorsque c'est possible ;
- Soit $D(t)$ l'ensemble qui regroupe toutes les propositions des départements à l'instant t (un argument par département). Une relation de préférence sur $D(t)$ est introduite pour sélectionner le département m_s ayant la meilleure proposition à cet instant du débat (voir la sous section 3.3.2-a). Les deux situations suivantes sont à distinguer :
 - 1- Si $D(t) \neq \emptyset$: des plans d'action peuvent encore être proposés ; la nouvelle proposition contribuera à augmenter le nombre de performances améliorées, c'est un argument *constructif* ;
 - 2- Si $D(t) = \emptyset$ ($S^{m_i}(t) = \emptyset, \forall m_i$) : alors aucun sous plan d'action consistant avec $SAP(t-1)$ ne peut être proposé. Par conséquent, toute proposition ajoutée à $SAP(t-1)$

implique des conflits de coût ou d'admissibilité. C'est une situation de blocage. Ce cas est associé à la requête d'un argument d'attaque : la prochaine proposition devra attaquer les précédentes et tout département ayant des actions dans $SAP(t-1)$ qui seront attaquées devra les retirer (voir la sous section 3.3.3) ;

- Dans les deux cas ci-dessus (1 et 2), la nouvelle proposition permet d'ajuster et d'actualiser les connaissances des autres départements à des fins de révision de leurs bases de connaissance (voir la sous section 3.3.4).

En outre, une fois qu'un argument est choisi, si le sous plan d'action associé à l'argument contient des actions bloquantes (les autres départements déclarent être incapables de les compenser), ces actions sont retirées de la proposition et elles ne pourront être incluses dans aucune prochaine proposition. Le département qui les a proposées peut les supprimer de sa base.

À chaque étape t , le sous-ensemble des actions d'amélioration peut être énoncé de la façon suivante : $SAP(t) = \bigcup_{k=0}^t AP_J^{m_i}(k)$.

Le débat s'arrête à l'instant t_f quand $SAP(t_f)$ améliore tous les critères de A^* sous les contraintes d'admissibilité et de coût requises ou quand aucune action supplémentaire n'est disponible et aucune solution n'a été trouvée.

Dans les sous-sections suivantes les étapes du débat sont présentées en détail.

3.3.2 La sélection des plans d'action

a. Partage équitable du budget

Nous supposons dans cette partie que $D(t) \neq \emptyset$. Ceci signifie qu'au moins un département a un argument à proposer pour continuer la construction du plan d'action commun.

L'approche considère que le groupe essaie toujours d'éviter un partage inéquitable du budget alloué en minimisant la perte du gain du département le moins bien satisfait (Labreuche, 2007). Ce comportement peut être représenté par des quantités comme $\min_{AP_J \in D(t)} \max_l r(l, SAP(t)) = \min_{AP_J \in D(t)} \max_l r(l, SAP(t-1) \cup AP_J)$, où AP_J est le plan d'action proposé pour compléter $SAP(t-1)$. Le choix de la proposition AP_J devra se faire dans l'ensemble $D(t)$ selon ce critère où chaque élément de $D(t)$ correspond à la meilleure proposition d'un département à cet instant (selon son choix individuel).

La perte maximale que peut subir le département le plus mal doté par une nouvelle proposition $AP_J \in D(t)$, est noté $lewp(AP_J)$ et elle est calculée en fonction de la perte de gain relative de m_i par rapport à $SAP(t-1) \cup AP_J$ (cf. formule (5.3)) de la façon suivante :

$$\forall AP_J \in D(t), lewp(AP_J) = \max_l r(l, SAP(t-1) \cup AP_J) \quad (5.4)$$

La formule (5.4) permet de déterminer la proposition qui minimise la perte du département le plus mal doté comme suit (la notation m_s fait référence au département détenteur de la proposition $AP_J^{m_s}$) :

$$AP_J^{m_s} = \arg \min_{AP_J \in D(t)} lewp(AP_J) \quad (5.5)$$

Par conséquent, le sous-ensemble d'actions $AP_J^{m_s}$ est sélectionné pour la prochaine proposition dans le débat. Ce choix a pour but de diminuer la perte du département m_s par rapport au sous-ensemble courant $SAP(t)$.

b. La stratégie individuelle de choix de plan d'action

Cette étape a pour objet de construire $D(t)$. A chaque instant t , tous les départements ayant des arguments disponibles doivent adopter une stratégie appropriée pour proposer l'argument le plus pertinent (le plus rentable en terme de coût) pour leur département. Un département m_l utilise l'algorithme *Branch & Bound* du Chapitre 4 localement sur $\mathcal{A}(m_l)$ pour trouver l'argument le plus pertinent pour ses intérêts. Cet argument est associé à un sous-ensemble d'actions AP_J qui doit être consistant avec $SAP(t-1)$ et constitue la meilleure solution pour m_l connaissant $SAP(t-1)$: m_l essaie de placer le maximum de ses actions qui ne sont pas en conflit avec $SAP(t-1)$.

Les critères de choix suivants à intégrer dans l'algorithme de *Branch & Bound* local peuvent être introduits en fonction de l'étape du débat :

- $AP_J^{m_l}(t)$ peut chercher à maximiser le nombre de critères à améliorer quand c'est possible, *i.e.*, lorsqu'il n'y a pas de conflit de coût ou d'admissibilité avec $SAP(t-1)$ (*arguments constructifs*) ;
- $AP_J^{m_l}(t)$ peut maximiser l'admissibilité en cas de conflit d'admissibilité (cf. Définition 5.9) (*arguments d'attaque*) ;
- $AP_J^{m_l}(t)$ peut minimiser le coût dans le cas de conflit de coût (cf. Définition 5.10) (*arguments d'attaque*).

Finalement, $D(t) = \{AP_J^{m_l}(t), 1 \leq l \leq M\}$ où J peut être vide pour les départements n'ayant pas de proposition.

3.3.3 La relation d'attaque

Dès que les arguments sont modélisés par des règles, il est clair qu'un argument attaque un autre si leurs conclusions sont en conflit ou si la conclusion de l'un d'eux réfute les prémisses du second (Amgoud and Prade, 2009) (Dung, 1995). Les définitions suivantes, concernant les conflits, sont introduites.

Quand $SAP(t-1)$ satisfait toutes les performances d'un sous-ensemble de performances $A \subset A^*$ et $D(t) = \emptyset$, alors, aucun plan d'action consistant avec $SAP(t-1)$ ne peut être proposé. Par conséquent, toute autre proposition ajoutée à $SAP(t-1)$ implique un conflit de coût ou un conflit d'admissibilité. Les actions qui sont à l'origine du blocage du débat sont à enlever du plan d'action d'amélioration courant. Ainsi, le prochain argument devra nécessairement attaquer des arguments composants $SAP(t-1)$.

Définition 5.9 : $D(t) = \emptyset$. Deux sous plans d'action $AP_{J_1}(t)$ et $AP_{J_2}(t' < t) \subseteq SAP(t-1)$ sont en conflit d'admissibilité par rapport à un critère i si il existe au moins deux actions $a_j \in AP_{J_1}(t)$ et $a_{j'} \in AP_{J_2}(t')$ qui sont incompatibles par rapport à i .

Définition 5.10 : $D(t) = \emptyset$. Deux sous plans d'action $AP_{J_1}(t)$ et $AP_{J_2}(t' < t) \subseteq SAP(t-1)$ sont en conflit de coût par rapport à un critère i^c si $AP_{J_1}(t)$ et $AP_{J_2}(t')$ améliorent i^c où i^c correspond aux actions d'amélioration les plus coûteuses.

Ainsi, la relation d'attaque suivante est introduite.

Définition 5.11 : Soient deux sous plans d'action $AP_{J_1}(t)$ et $AP_{J_2}(t' < t) \subseteq SAP(t-1)$, il y a une relation d'attaque \mathcal{R} entre les deux arguments $\arg_1 = \langle AP_{J_1}(t) \wedge (SAP(t-1) \cup AP_{J_1}(t) \xrightarrow{+} A') \rangle$ et $\arg_2 = \langle AP_{J_2}(t' < t) \wedge (SAP(t-1) \xrightarrow{+} A) \rangle$, si $D(t) = \emptyset$, $A \subset A^*$, $A' \cap (A^* \setminus A) \neq \emptyset$ et $AP_{J_1}(t)$ est en conflit d'admissibilité ou de coût pour un critère $i \in A'$ avec $AP_{J_2}(t')$.

L'ensemble A' ne contient pas nécessairement l'ensemble A . En effet, une attaque implique forcément une élimination d'actions du plan d'action $SAP(t-1)$ ce qui ne garantit pas que les performances améliorées par $SAP(t-1)$ soient les mêmes que celles améliorées par $SAP(t)$.

3.3.4 Le partage des connaissances pour un but collectif

Soit m_l le département qui détient la prochaine proposition $AP_{J_l}^{m_l}(t) \subseteq \mathcal{A}(m_l)$. Comme les départements $m_{l' \neq l}$, a priori, ne connaissent pas le degré d'impact des actions de $\mathcal{A}(m_l)$, ils doivent les apprendre et les estimer à partir de la discussion. Le département m_l devra alors

indiquer la structure du digraphe de sa proposition (*i.e.*, qu'il indique toutes les performances qu'impactent ses actions), puis la mise à jour des paramètres d'impact du digraphe sera effectuée par les autres départements. Elle se fait de la façon suivante :

Si le département m_l commence le débat, il fournit les degrés d'impacts exacts de $AP_J^{m_l}(t=1)$ sur chaque performance P_i influencée par $AP_J^{m_l}(1)$. Alors, $\forall l', \forall j \in J, \forall i \in A^*$, $\delta_{ij}^s(l') = \delta_{ij}^s(l)$ et tous les départements vont déduire le degré d'impact minimal positif, noté $\min_i^+(1)$, et le degré d'impact maximal négatif, noté $\max_i^-(1)$, par rapport à chacune des performances P_i influencées par $AP_J^{m_l}(1)$.

A chaque instant $t > 1$, $\min_i^+(t)$ et $\max_i^-(t)$ sont calculés : soit $AP_J^{m_l}(t) \subseteq A(m_l)$ le sous plan d'action ajouté à $SAP(t-1)$. Si $\exists a_j \in AP_J^{m_l}(t)$ et $i \in A^*$ tel que $\delta_{i,j}^s < \min_i^+(t-1)$ (resp. $\delta_{i,j}^d > \max_i^-(t-1)$) alors m_l doit fournir le degré d'impact exact de a_j pour la mise à jour de $\min_i^+(t)$ (resp. $\max_i^-(t)$).

Comme $AP_J^{m_l}(t)$ est consistant avec $SAP(t-1)$, les départements $m_{l' \neq l}$ peuvent inférer les bornes des influences $\lambda_{i,j}^s$ and $\lambda_{i,j}^d$ de chaque action dans $AP_J^{m_l}(t)$ sur chaque performance P_i en utilisant la formule de (5.1) comme suit : $\lambda_{i,j}^s = \min_i^+(t)$ et $\lambda_{i,j}^d = \max_i^-(t)$.

Quand $AP_J^{m_l}(t)$ attaque des arguments de $SAP(t-1)$ (voir la sous section 3.3.3) alors des actions sont retirées de $SAP(t-1)$ et le département ayant le nouveau degré d'impact négatif maximum ou le nouveau degré d'impact positif minimum sur une performance donnée, doit déclarer les nouvelles valeurs de référence. Cela permet aux autres départements de réviser leurs connaissances en ajustant les paramètres d'impact.

Les départements sont censés faire preuve de coopération, c'est-à-dire que seuls les arguments pertinents et utiles sont échangés pour réaliser un plan d'action consensuel mais aussi qu'une solution satisfaisante ne peut être rejetée à des fins strictement personnelles.

3.4 Propriétés du cadre d'argumentation

Dans le cas où $SAP(t_f)$ est construit comme décrit ci-dessus et qu'il améliore toutes les performances de A^* , alors $SAP(t_f)$ est la solution qui conclut la recherche collective du plan d'action d'amélioration.

Soit \mathcal{G} l'ensemble de tous les arguments que les départements ont proposés durant le débat : ceux dans $SAP(t_f)$ ainsi que tous arguments retirés suite à des attaques formulées pendant le débat. Soit le cadre d'argumentation $AF = \langle \mathcal{G}, \mathcal{R} \rangle$ avec \mathcal{R} la relation d'attaque définie dans la Définition 5.11 de la section 3.3.3. Soit S l'ensemble de tous les arguments dont les

actions associées appartiennent à $SAP(t_f)$ et $S' = \{\arg \in \mathcal{G} \setminus S / \nexists \arg' \in S, (\arg', \arg) \in \mathcal{R}\}$ (S' est l'ensemble des arguments dans $\mathcal{G} \setminus S$ qui ne sont pas en conflit avec les arguments de S). S' n'est pas nécessairement vide : par exemple, si l'action $a_j \in SAP(t_1)$, il se peut qu'un argument supportant a_j ait été attaqué par un autre argument \arg à l'instant t_2 ($t_1 < t_2 < t_f$); plus tard, à l'instant t_3 ($t_2 < t_3 < t_f$), cet argument est attaqué à son tour et donc retiré de S . Ainsi, $a_j \in \mathcal{G} \setminus S$ mais il n'est pas nécessairement attaqué par S .

Si le problème collectif admet une solution, alors nous déduisons les propriétés suivantes :

Propriété 5.1 : Si $SAP(t_f)$ est un plan d'action admissible (Définition 5.2) alors S est un ensemble d'arguments admissibles (dans le sens de Dung, Définition 5.3).

Preuve : S est sans conflit car $s_{A^*}(SAP(t_f)) > 0$ (pas de conflit d'admissibilité entre les éléments de S) et $c(SAP(t_f)) < B$. De plus, aucun argument de $\mathcal{G} \setminus S$ ne peut attaquer un élément dans S car $SAP(t_f)$ améliore $A = A^*$ (une relation d'attaque sur $SAP(t_f)$ nécessite la condition $A \subset A^*$). Par conséquent, S est admissible. ■

Propriété 5.2 : $\exists S'' \subset S' / S \cup S''$ est une extension préférée de AF .

Preuve : Soit $\mathcal{G} = S \cup S' \cup S_1$ où S_1 est l'ensemble des arguments rejetés pendant la construction du plan d'action et ayant encore un argument qui les attaque dans S . Considérons $S'' = S' \setminus \{\arg / \exists \arg' \in S', (\arg', \arg) \in \mathcal{R}\}$. $S \cup S''$ est sans conflit par définition de S et S'' . S est admissible par construction. Soit $\arg'' \in S''$: si \arg'' a un argument qui l'attaque, il est forcément dans S_1 par construction de S'' or tous les arguments de S_1 sont attaqués par S . $S \cup S''$ est donc admissible. Maintenant il reste à montrer que $S \cup S''$ est maximale. Supposons qu'il existe une extension admissible $MAX \supset S \cup S''$. $MAX \cap S_1 = \emptyset$ sinon il y aurait des conflits dans MAX . Un élément de MAX qui n'est pas dans $S \cup S''$ est donc forcément dans $S' \setminus S''$. Considérons un argument $\arg \in MAX \setminus (S \cup S'')$: $\arg \in S' \setminus S''$ implique que $\exists \arg' \in S' / (\arg', \arg) \in \mathcal{R}$, si $\arg' \in MAX$, il y a des conflits dans MAX ce qui est absurde et si $\arg' \notin MAX$ alors \arg n'est pas acceptable par rapport à MAX ce qui est absurde. $MAX \setminus (S \cup S'') = \emptyset$ et $S \cup S''$ est maximale.

Remarque si S' est sans conflit alors $S' = S''$. ■

En d'autres termes, les extensions préférées contenant $SAP(t_f)$ peuvent être construites mais l'ensemble des actions associé aurait un coût supérieur à celui de $SAP(t_f)$ ce qui est inutile pour le problème qui nous intéresse.

4. Intérêts et limites de l'approche

4.1 Intérêts

L'algorithme que nous proposons permet de gérer la combinatoire des arguments. Le simulateur du débat entre les départements associé a été intégré dans notre SIADG. Outre la formalisation d'un problème de décision en organisation, cette modélisation est motivée par les finalités suivantes :

- Premièrement, quand l'ensemble des actions potentielles est très grand, alors l'utilisation d'une méthode d'optimisation globale conduit rapidement à un problème combinatoire comme nous l'avons vu au chapitre précédent (Montmain and Labreuche, 2009) ; (Montmain et al., 2010). Les techniques de simulation, où les départements sont indépendants mais coopératifs, permettent de réduire la complexité des calculs. Un département m_i utilise seulement un modèle d'optimisation local pour calculer une amélioration partielle (*i.e.*, d'un petit nombre de critères). Ce modèle est mieux adapté à des situations concrètes où chaque département contrôle son propre savoir faire, et ne partage que la partie de ses connaissances qui est juste nécessaire pour atteindre l'objectif global, tout en défendant ses intérêts et ne révélant finalement pas nécessairement ses faiblesses ;
- Deuxièmement, la simulation du débat peut être envisagée comme un système d'aide à la décision par un département m_i (ou un groupe de départements) durant le débat réel pour optimiser son propre intérêt ;
- Troisièmement, simuler l'issue de la négociation argumentée peut être utilisé a posteriori pour vérifier que la décision finale repose sur des critères rationnels (rationalisation des coûts, partage équitable des ressources, etc.). Dans ce cas, la finalité de notre système d'aide à la décision est davantage l'explication ;
- Enfin, le débat est vu comme un processus dynamique dans cette approche de simulation. Notre modélisation peut être envisagée pour contrôler le débat : le système d'aide à la décision pourrait aider la direction à gouverner la négociation entre les départements afin d'améliorer la convergence du débat ou de mieux partager les ressources allouées.

4.2 Limites

Les actions d'amélioration qui sont sélectionnées ne correspondent pas, en général, à un optimum global en ce qui concerne les coûts de l'amélioration. Cependant, ils répondent aux objectifs de performance et aux contraintes budgétaires qui sont exigés par la direction d'une part, et résultent d'une négociation consensuelle entre les départements d'autre part. La direction ne peut que valider la décision même si elle est probablement sous-optimale, mais au final personne n'a forcément conscience de l'existence de cet optimum : une solution

satisfaisante raisonnable a été établie en dépit du processus de filtrage d'information par l'organisation. Ceci illustre le concept de rationalité limitée de Simon (Simon, 1991b).

5. Illustration

5.1 Présentation du cas d'étude

L'étude de cas concerne la gestion adaptative d'une unité de fabrication qui doit évoluer dans un contexte complexe. Dans un marché concurrentiel où les entreprises tentent d'augmenter leur clientèle, la satisfaction de ces derniers est considérée comme un facteur clé de différenciation et devient un élément clé de la stratégie des entreprises. A cause de cet environnement évolutif, les dirigeants sont obligés d'adapter en permanence le management de leurs unités, leur stratégie d'exploitation globale. Les priorités stratégiques évoluent avec le temps en fonction du contexte concurrentiel, social ou politique, et des actions d'amélioration nouvelles doivent constamment être prévues pour compenser les perturbations contextuelles. L'usine de fabrication est ainsi vue comme un système complexe qui exige une gestion adaptative pour rester compétitive.

Par conséquent, l'exemple est présenté du point de vue du management plutôt que de celui du génie industriel. C'est la raison pour laquelle les actions d'amélioration dans ce cas d'étude peuvent tout aussi bien être des méthodes d'amélioration (*i.e.*, Kanban) comme des actions stratégiques (*i.e.*, la formation du personnel). Cette ambiguïté pourrait être critiquée d'un point de vue purement génie industriel, mais ne nécessite pas plus d'attention pour la compréhension de ce cas d'étude.

L'objectif global de l'entreprise est d'augmenter sa performance mesurée à travers la satisfaction de ses clients. Cinq critères sont désignés par l'entreprise pour représenter sa performance globale : *la gamme de produits*, *prix des produits*, *qualité des produits* et *le délai de livraison* qui sont complétés par un critère interne : *le climat social*. Les actions en relation avec ces performances peuvent correspondre à la mise en place de méthodes d'amélioration des performances industrielles. Six méthodes d'amélioration classiques sont examinées : *Kanban* (le *Kanban* est associé au lean manufacturing et à la production juste-à-temps), le SMED (Single-Minute Exchange of Die: fournit un moyen rapide et efficace de conversion d'un processus de fabrication du produit en cours au produit suivant), Poka-Yoke (un Poka-Yoke est un mécanisme dans un processus de lean manufacturing qui aide un opérateur à éviter les erreurs. Son but est d'éliminer les défauts du produit par la prévention, par la correction ou par l'attention portée aux erreurs humaines), Six Sigma (la méthode Six Sigma vise à améliorer la qualité des résultats des processus en minimisant la variabilité dans le processus de fabrication), de TQM (Total Quality Management est un ensemble de pratiques de gestion dans toute l'organisation, dont le but est d'assurer que l'organisation opère de façon cohérente pour satisfaire voire dépasser les exigences des clients), TPM (Total Predictive Maintenance est une nouvelle façon d'aborder la maintenance. TPM est une approche proactive qui vise essentiellement à éviter toute sorte de négligence avant un accident). Cinq

actions stratégiques sont ensuite envisagées : la gestion des relations avec les fournisseurs, la délocalisation partielle à la recherche de main-d'œuvre bon marché, la formation du personnel, la politique de traçabilité, le respect des normes et de nouvelles politiques de conformité.

Les six méthodes d'amélioration des performances industrielles et les cinq actions stratégiques définissent l'ensemble des actions \mathcal{A} ($|\mathcal{A}| = 11$). Elles ne sont pas censées être mutuellement exclusives et il n'existe aucune contrainte concernant leur application conjointe : elles peuvent être réalisées de manière indépendante afin d'améliorer les performances (cette hypothèse peut être discutée d'un point de vue du génie industriel, mais les contraintes d'exclusivité ou de simultanéité réduiraient simplement la combinatoire des calculs de plans d'action et n'impliqueraient donc aucune nouvelle difficulté dans notre approche).

Nous rappelons ici la procédure itérative générale de l'amélioration énoncée dans la section 3.1 du Chapitre 4 :

1. Définir le niveau de performance global e ;
2. Définir le système initial $\gamma \in \Gamma_A$ à améliorer ;
3. Calculer le profil de performance $a : \forall i \in N, a_i = T_i(\gamma)$;
4. Dédire le niveau de performance pour $\gamma : p = F(u_1(T_1(\gamma)), \dots, u_n(T_n(\gamma))) = F(a)$.
S'arrêter si $p \geq e$;
5. Calculer les performances à améliorer en priorité : $A^* = \underset{A \subseteq N}{\text{Arg max}} \omega_A^\wedge(F, a)$;
6. Identifier les paramètres γ^* pour agir sur les critères de A^* (si A^* est réalisable) ;
7. Aller à l'étape 3.

5.2 Les étapes de 1 à 5

Supposons que la performance globale de l'entreprise soit définie comme l'agrégation des cinq critères (*gamme de produits, prix des produits, qualité des produits, délai de livraison, climat social*) avec une intégrale de Choquet. Dans cette application, nous considérons un cas particulier d'intégrales de Choquet plus faciles à identifier, basées sur une mesure 2-additive (voir la section 5.1 du Chapitre 2).

Le Tableau 5.1 fournit les performances a initiales de l'entreprise, l'indice de Shapley associé à chaque critère et les coûts moyens approximatifs d'amélioration des performances de 0 à 1 (cu_i). Les interactions entre les critères sont présentées dans le Tableau 5.2. L'importance relative associée à un critère dépend du contexte. Il est supposé que les managers ont analysé et diagnostiqué la concurrence des marchés avant d'établir leurs priorités d'amélioration. Dans le contexte relatif à a , le modèle de préférence représenté par l'intégrale de Choquet peut être synthétisé avec une règle de type : l'entreprise porte une attention toute particulière aux politiques de qualité et de prix des produits, mais cette politique doit être impérativement

accompagnée de services adéquats (gamme de produits, délai de livraison) pour être réellement attractive (interactions positives). Par ailleurs, la société doit préserver son climat social (indépendance).

	Performances	Indices de Shapley (v_i)	Coûts (c_i)	a
P1	Climat social : SC	0.1	1000k€	0.7
P2	Délai de livraison : TD	0.1	3000k€	0.8
P3	Prix des produits : PP	0.25	5000k€	0.6
P4	Gamme des produits : RP	0.05	2000k€	0.7
P5	Qualité des produits : PQ	0.5	5000k€	0.4

Tableau 5.1 : Les poids, les coûts et les performances initiales.

Interactions entre	valeur
Délai de livraison - Qualité des produits	0.1
Délai de livraison - Gamme des produits	0.05
Prix des produits - Gamme des produits	0.05
Prix des produits - Qualité des produits	0.3

Tableau 5.2 - Les coefficients d'interactions

Le Tableau 5.3 présente les paramètres du modèle de comportement qui lie les actions et les performances associées aux critères. Par exemple, l'action « *Délocalisation Partielle* » a un impact positif sur la performance de la politique de prix bas ; d'autre part, elle a évidemment un impact négatif sur le climat social de l'entreprise.

La performance initiale globale de la satisfaction clients correspondant au vecteur a (Tableau 5.1) calculée est : 0,48. La question devient : « comment ce résultat peut-il être amélioré ? ».

Dans cet exemple d'illustration, nous considérons que chaque action a un coût identique. Les plans d'action les plus pertinents (les moins coûteux) sont donc ceux contenant le moins d'actions. Toutes les performances de A^* sont considérées d'importance égale.

L'objectif global $e=0.85$ est fourni par le manager. Le calcul de l'indice de plus value indique que la performance du critère *qualité des produits* (PQ) est la plus pertinente à améliorer en priorité.

5.3 L'hypothèse collaborative

Une fois l'ensemble A^* identifié, l'étape suivante consiste à déterminer les plans d'action qui améliorent A^* dans un cadre de raisonnement donné. Pour l'hypothèse collaborative, le projet d'amélioration est conçu en utilisant les cadres de raisonnement (PM_1, AF_1) et (PM_2, AF_1)

présenté dans la section 3.3 du Chapitre 4. Les résultats sont résumés dans le Tableau 5.4 et les attitudes stratégiques associées aux cadres de raisonnement sont finalement commentées.

5.3.1 Attitude pessimiste

Dans la section 5.2, la performance du critère *qualité des produits* (PQ) a été identifiée comme la plus pertinente à améliorer en priorité : $A^* = \{PQ\}$. Dans le cadre de raisonnement (PM_1, AF_1) , l'algorithme de *Branch & Bound* du Chapitre 4, recommande alors d'introduire les politiques (actions) « *TQM* » et « *TPM* » dans l'entreprise. L'application conjointe de « *TQM* » et « *TPM* » garantit une amélioration significative de la performance *qualité des produits* sans produire d'impact négatif sur les autres performances. Le plan d'action recommandé est alors $\{TPM, TQM\}$ avec un degré d'admissibilité $\alpha = 0.9$.

Afin d'illustrer l'amélioration itérative qui a été proposée dans la section 3.1 du Chapitre 4, considérons que le profil atteint après l'application du plan d'action $\{TPM, TQM\}$ soit $b = (0.7, 0.8, 0.6, 0.7, 0.8)$ avec la performance globale associée de : 0.7. Ceci signifie que le plan d'action a été appliqué avec succès, mais que l'amélioration globale est encore insuffisante à l'égard de l'objectif global attendu $e = 0.85$. Une nouvelle amélioration doit être conçue. L'amélioration concernant la performance du critère *qualité des produits* est significative (la performance est de 0.4 à 0.8). Deux cas peuvent être envisagés : le manager peut considérer qu'il ne pourra pas mieux faire que 0.8 et il est satisfait de ce résultat déjà remarquable concernant le critère *qualité des produits*. Ainsi, en bloquant le critère *qualité des produits*, il décide de mener le projet d'amélioration uniquement sur les performances des critères *climat social* et *prix des produits*. Le nouveau plan d'action est $\{Kanban, Formation du personnel\}$ avec un degré d'admissibilité élevé : $\alpha = 0.9$. Dans l'autre cas, il décide alors que le prochain plan d'action doit améliorer les performances des critères *climat social*, *prix des produits* et *qualité des produits*. Dans ce cas, les nouveaux plans d'action recommandés sont :

- Avec une admissibilité $\alpha = 0.3$: $\{TPM, Politique de traçabilité\}$
- Avec une admissibilité $\alpha = 0.7$: $\{6Sigma, Délocalisation partielle, Formation du personnel\}$

Notons que si l'un de ces plans d'action est sélectionné, il améliore dans la pratique tous les critères. En effet, les actions recommandées pour améliorer tous les critères simultanément sont :

- Avec une admissibilité $\alpha = 0.2$: $\{TPM, Politique de traçabilité\}$ ou $\{Kanban, Formation du personnel\}$ ou $\{Kanban, Gestion des relations avec les fournisseurs\}$.
- Avec une admissibilité $\alpha = 0.7$: $\{6Sigma, Délocalisation partielle, Formation du personnel\}$

Nous pouvons remarquer que ces plans d'action sont identiques à ceux où l'amélioration concerne uniquement les critères *climat social*, *prix des produits* et *qualité des produits*. Cependant, plus il y a de critères à améliorer, bien sûr plus le degré d'admissibilité est faible.

	6Σ	KANBAN	SMED	POK	TQM	TPM	SRM	PR	ST	TP	CNP
PP	-0.2	0.9	-	-0.3	-0.2	0.3	-0.4	0.9	-0.6	-0.2	-0.5
PQ	0.8	0.2	0.3	0.6	0.9	-	-	-0.5	0.7	0.8	0.8
TD	0.5	0.5	0.8	0.2	-0.3	0.8	0.7	-	-	0.2	-0.3
SC	-0.2	-0.5	-0.5	0.5	0.1	-	0.6	-0.8	0.9	0.3	-
RP	-	0.6	0.7	-0.4	-	0.4	0.7	-	0.5	-0.3	-0.4

Tableau 5.3 : Les relations entre actions et performances des critères

Dans le Tableau 5.3, les notations suivantes sont considérées :

- 6Σ : 6 SIGMA
- SRM : la gestion des relations avec les fournisseurs
- ST : la formation du personnel
- CNP : le respect des normes et de nouvelles politiques de conformité
- POK : POKAYOKE
- PR : la délocalisation partielle à la recherche de main-d'œuvre bon marché
- TP : la politique de traçabilité

Cet exemple illustratif ne prétend pas que les décisions proposées par l'algorithme sont pertinentes d'un point de vue du génie industriel. Par exemple, il y a des contraintes de priorité dans les relations entre les actions qui sont cachées dans le modèle. Il illustre simplement comment un modèle de préférence et un modèle qualitatif de comportement peuvent être utilisés conjointement dans une procédure itérative de conception de management adaptatif d'un système complexe. Le Tableau 5.4 résume les résultats précédents avec le cadre de raisonnement (PM_1, AF_1) dans la colonne *attitude pessimiste*.

5.3.2 Attitude optimiste

Considérons maintenant le même scénario (la colonne *scénario d'amélioration* du Tableau 5.4 rappelle les quatre recherches de plans d'action effectués précédemment) quand le cadre de raisonnement (PM_2, AF_1) est utilisé. Lorsque le projet d'amélioration ne concerne que la performance du critère *qualité des produits*, les deux attitudes, pessimiste et optimiste, fournissent le même diagnostic avec la même admissibilité : $\alpha = 0.9$, $\{TPM, TQM\}$. Cependant, alors que la solution $\{Kanban, Formation du personnel\}$ est manifestement inadéquate avec une attitude pessimiste ($\alpha = 0.2$), elle apparaît comme une alternative intéressante pour l'amélioration quand l'attitude optimiste est adoptée ($\alpha = 0.7$). Lorsque le projet d'amélioration des performances concerne les critères *prix des produits* et *climat social*, les deux attitudes donnent la même solution : $\alpha = 0.9$, $\{Kanban, Formation du personnel\}$. Lorsque l'amélioration devient plus complexe, c'est-à-dire qu'il y a plusieurs critères à améliorer simultanément, il est évident que la stratégie optimiste offre une plus large palette de solutions admissibles. En outre, ces solutions sont également considérées avec un degré d'admissibilité généralement supérieur.

<i>scénario d'amélioration</i>	<i>attitude pessimiste</i>	<i>attitude optimiste</i>
{Qualité du produit}	$\alpha = 0.2 :$ - {Kanban, SRM} ou - {Kanban, ST} ou $\alpha = 0.9 : \{TQM, TPM\}$	$\alpha = 0.2 :$ - {Kanban, SRM} ou - {Kanban, ST} $\alpha = 0.7 : \{Kanban, ST\}$ $\alpha = 0.9 : \{TQM, TPM\}$
{Prix des produits, Climat Social}	$\alpha = 0.9 :$ - {Kanban, ST}	$\alpha = 0.6 : \{Kanban, SRM\}$ $\alpha = 0.9 : \{Kanban, ST\}$
{Qualité du produit, Prix des produits, Climat Social}	$\alpha = 0.2 :$ - {Kanban, SRM} ou - {Kanban, ST} $\alpha = 0.3 : \{TP, TPM\}$ $\alpha = 0.7 : \{6Sigma, PR, ST\}$	$\alpha = 0.7 : \{Kanban, ST\}$ $\alpha = 0.8 :$ - {Kanban, TP, ST} ou - {Kanban, CNP, ST} ou - {PR, TP, ST} $\alpha = 0.9 :$ - {TPM, PR, TQM, ST} ou - {Kanban, TP, TQM, ST} ou - {Kanban, CNP, TQM, ST} ou - {ST, TQM, SMED, PR} ou - {ST, TQM, SRM}
Toutes les performances	$\alpha = 0.2 :$ - {Kanban, SRM} ou - {Kanban, ST} ou - {TP, TPM} $\alpha = 0.5 : \{6Sigma, PR, ST\}$	$\alpha = 0.5 : \{Kanban, ST\}$ ou $\alpha = 0.7 : \{SRM, ST, PR\}$

Tableau 5.4 : Comparaison des attitudes décisionnelles

5.4 L'hypothèse coopérative

Dans le cas coopératif (et uniquement dans le cadre de raisonnement (PM_1, AF_1)), nous considérons que le projet d'amélioration doit être mené par trois départements qui doivent partager et respecter le budget alloué par la direction. Dans la simulation, nous supposons que les actions du Tableau 5.3 sont partagées entre les départements de la manière suivante :

- $A(m_1) = \{a_1 : '6\Sigma', a_2 : 'Kanban', a_3 : 'SMED', a_4 : 'POK'\}$;
- $A(m_2) = \{a_5 : 'TQM', a_6 : 'TPM', a_7 : 'SRM'\}$;
- $A(m_3) = \{a_8 : 'PR', a_9 : 'ST', a_{10} : 'TP', a_{11} : 'CNP'\}$.

Pour les critères, nous rappelons les notations (notations dans notre simulateur pour les copies d'écran qui suivent) :

	Performances
P1	Climat social : SC
P2	Délai de livraison : TD
P3	Prix des produits : PP
P4	Gamme des produits : RP
P5	Qualité des produits : PQ

Nous avons développé un outil logiciel intégré à notre SIADG qui supporte la méthode présentée dans ce chapitre afin de simuler une négociation argumentée entre les trois départements.

Elle est appliquée ici pour le cas d'étude lorsqu'on cherche à améliorer les cinq critères simultanément. Le résultat de la délibération dépend du département qui propose la première offre. Supposons que $\alpha_0 = 0.2$ et que le budget alloué est $B = 4$, quand le département 3 commence la négociation, il propose l'argument : $AP_{J_1} = SAP(1) = \{a_9, a_{10}\}$ pour maximiser son gain et améliorer la performance des critères dans l'ensemble $A = \{P_2, P_3, P_4, P_5\}$ (voir Figure 5.2, $\min = 1.1$ signifie simplement que par convention il n'y a pas encore d'impact sur la performance, $\max = 0$ signifie qu'il n'y pas d'impact négatif sur la performance). Comme $D(2) = \emptyset$ (situation de blocage), le département 1 annonce son argument associé aux actions de $AP_{J_2} = \{a_2\}$ pour attaquer l'argument supportant AP_{J_1} à cause du conflit d'admissibilité sur la performance P_4 . Cela induit la conséquence suivante : l'action a_{10} doit être retirée du plan d'action construit collectivement et $SAP(2) = \{a_2, a_9\}$ (voir la Figure 5.3).

Dans ce cas, la solution fournie par le débat $\{a_2, a_9\} = \{Kanban, ST\}$ appartient à l'ensemble des solutions optimales fournies par l'algorithme global du *Branch & Bound* dans la section précédente. Ce n'est pas toujours le cas pour de multiples raisons : premièrement, l'objectif des deux approches n'est pas le même à partir du moment où chaque département ne tente pas seulement de contribuer à l'objectif final sous la contrainte du coût, mais essaie aussi de maximiser son gain dans l'approche argumentative. Deuxièmement, les départements proposent des solutions qui respectent simplement les contraintes de coût et d'admissibilité dans l'approche argumentative. C'est une solution qui est en général sous-optimale. Cependant la direction n'est pas au courant de l'existence d'une solution plus optimale. C'est l'effet de la rationalité limitée dans les décisions d'organisation.

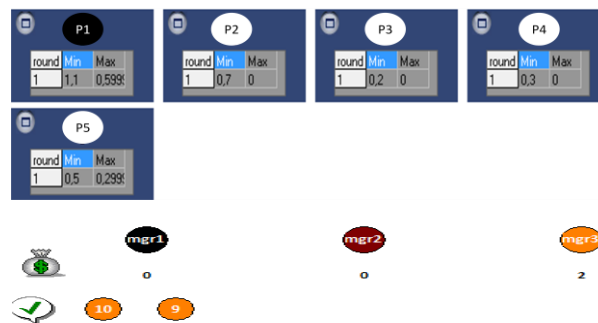


Figure 5.2 Situation ($t=1$) quand mgr3 commence le débat – les actions et leur propriétaire ont la même couleur

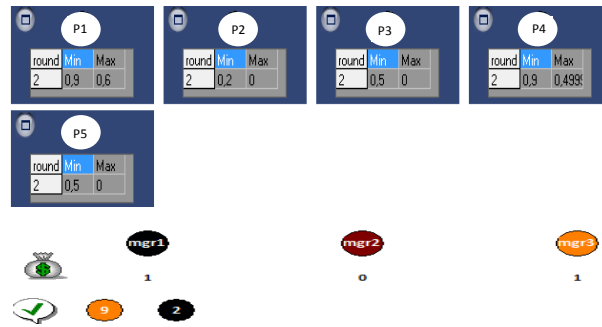


Figure 5.3 : Situation ($t=2$) après l'attaque de mgr1 contre mgr3 qui fournit la solution ($cost=2$, le gain de mgr1 et de mgr3 est 1)

6. Conclusion

L'approche proposée dans ce chapitre repose sur une négociation argumentée entre départements et est basée sur la théorie de l'argumentation initialement proposée par Dung. Nous ne faisons que reprendre des éléments de cette théorie et l'appliquer à notre problématique, mais à notre connaissance, il n'y a pas de cas d'application concret relaté dans la littérature, où un nombre conséquents d'arguments doit être géré, et permettant de mettre en valeur cette théorie.

Par conséquent, ce chapitre propose un système d'aide à la décision pour assister les départements à concevoir collectivement un plan d'action améliorant les performances de leur entreprise. Un cadre d'argumentation a été proposé pour gérer les conflits d'intérêts entre ces agents coopératifs. Il permet de simuler des négociations argumentées et fournit ainsi un système approprié d'aide à la décision pour les projets d'amélioration complexes.

La simulation du débat est intéressante pour plusieurs raisons :

- C'est une alternative à l'optimisation globale ;
- Elle peut être envisagée comme un système d'aide à la décision par un département particulier ;
- Elle peut être utilisée comme un système de support pour l'explication ou le contrôle de l'évolution du débat ;
- Elle permet d'envisager le pilotage de la délibération argumentée en s'assurant que les objectifs de l'organisation soient atteints sans pour autant négliger les intérêts individuels. Elle constitue ainsi une aide précieuse pour limiter les erreurs de coordination.

Ce chapitre a permis de bâtir un modèle pour simuler un débat basé sur la théorie de l'argumentation qui manipule un nombre conséquent d'arguments et gère la cohérence des bases de connaissances des agents. Il nous semble constituer une application concrète et à l'échelle pour la théorie de Dung, à la construction collective d'un plan d'actions. Il fait le lien entre une extension admissible au sens de Dung et un plan d'action admissible au sens du

Chapitre 4. Par ailleurs, il nous semble être un modèle plus fidèle de la décision en organisation que la formulation en un problème d'optimisation multi objectifs global comme nous l'avons proposé dans le chapitre précédent. La décision et les connaissances qui la supportent se construisent dynamiquement, les contraintes organisationnelles se mêlent indistinctement au jeu des acteurs de la décision.

Plusieurs critères de choix ont été introduits pour la sélection des plans d'action (minimisation de la perte de revenus, utilisation d'opérateurs d'agrégation de l'admissibilité (*i.e.*, le cadre de raisonnement), etc.). Ils fournissent un modèle rationnel qui permet de résoudre une large classe de problèmes. Cette catégorie de problèmes peut néanmoins être élargie en fournissant d'autres critères avec des sémantiques nouvelles. C'est l'une des préoccupations de nos travaux futurs. Enfin, seules des notions de base de la théorie de l'argumentation ont été utilisées dans ce modèle, des cadres plus complexes comme les cadres contextuels d'argumentation basés sur les préférences pourraient être introduits dans nos travaux pour modéliser l'ensemble évolutif d'arguments (Bourguet, Amgoud and Thomopoulos, 2010).

Conclusion générale

La description d'un processus décisionnel comme l'enchaînement potentiel de situations de management des risques induit une dynamique événementielle du processus : à cette échelle macroscopique du processus de décision, le passage d'une situation à l'autre est lié à l'occurrence d'événements redoutés ou forcés. C'est cette dynamique qu'évoque la Figure 1.5 (les situations de management des risques) du Chapitre 1. Ces scénarios d'évolution peuvent donc être décrits par des modèles dynamiques discrets, où les événements caractérisent une discontinuité dans la nature des risques à gérer et se modélisent, par exemple, via les conditions de franchissement des transitions d'un automate temporisé probabiliste ou d'un réseau de Pétri stochastique. Il s'agit là, d'une description macroscopique de la dynamique des processus de décision, induite par l'interprétation en termes de management du risque. A l'échelle d'une situation, le franchissement d'une transition de l'échelle macroscopique constitue donc une rupture de modèle dont la cause est soit une perturbation extérieure soit un changement volontaire d'orientation stratégique.

Dans un second temps, il s'agit d'analyser la dynamique de chacune des situations du diagramme du management des risques. Ce second niveau d'analyse est lui du ressort d'une modélisation dynamique continue du processus de décision. Dans ce manuscrit, nous nous sommes attachés à définir à quoi tient la dynamique continue d'une situation. Lorsque la décision relève d'une dimension organisationnelle ou stratégique, elle inclut une phase d'information qui en est, pour H.A. Simon, père de la théorie économique de la rationalité limitée, l'étape clé. La phase d'information ou d'intelligence consiste initialement à identifier les objectifs ou buts du décideur, c'est-à-dire à définir le problème à résoudre, puis à construire le corpus des connaissances nécessaires à une décision raisonnée entre les alternatives concurrentes. Pour cela, il est nécessaire de rechercher les informations pertinentes en fonction des questions que se pose le décideur. La fiabilité de cette phase d'information conditionne tout le processus. De plus, la durée de cette phase induit la dynamique de la situation de décision. La phase d'information dans les problèmes de décision collective qui nous intéressent correspond à la délibération. Les différentes phases de la décision ne se présentent pas de façon linéaire, mais en boucles. De nombreuses itérations sont nécessaires, au vu de la complexité des décisions organisationnelles ou stratégiques, avant qu'un terme ne puisse être apporté au processus de décision. Phases d'information (Intelligence), de représentation (Design), de sélection (Choice) et de bilan (Review) se succèdent sans logique chronologique préétablie possible (modèle IDCR de H.A.Simon) (Simon, 1991a) ; (Simon, 1977). C'est le déroulement de cet enchaînement, le nombre d'itérations pour acquérir les connaissances nécessaires pour justifier d'un choix, qui déterminent la dynamique de la décision. Pour une situation donnée, l'évolution des

connaissances utiles—les connaissances actionnables—à la décision induit une dynamique propre à la situation. C'est ce processus de construction collective des connaissances actionnables que nous nous sommes attachés à modéliser. Ensuite, nous avons proposé différents moyens de contrôle afin de contrôler cette dynamique de la phase d'information, d'imposer une dynamique forcée.

A partir d'un état initial des connaissances sur les alternatives que la situation de décision met en jeu, la quête de l'information s'affine et consiste alors à ne s'enquérir que des points critiques du problème sur lesquels l'état des connaissances ne permet pas de définir une situation décidable de façon fiable (indiscernabilité des alternatives, incertitude d'une évaluation, objectifs non atteints, instabilité des évaluations, pas de consensus, etc.). Pour parvenir à cette situation, il faut combler un déficit informationnel qui, tant qu'il subsiste, induit une incertitude épistémique, autrement dit un risque décisionnel lié à l'état insuffisant des connaissances à un instant donné pour pouvoir trancher. Plus la quête du savoir avance (quand elle est bien pilotée), plus l'incertitude épistémique est supposée diminuer et la situation décidable se dessiner. L'enjeu de ce processus dynamique cognitif est de savoir conduire la recherche d'information avec perspicacité au cours de la délibération : sur quels aspects du problème sera-t-il le plus judicieux d'acquérir des compléments d'information pour réduire au mieux, au plus vite, cette incertitude et accélérer ainsi la dynamique de décision ?

Ce qu'il est important de retenir au travers ces remarques, c'est le caractère dynamique de la décision induit par l'évolution du continuum des savoirs durant la phase de délibération et la nécessité de bien conduire cette délibération pour arriver à une conclusion stable au plus vite. Piloter l'acquisition d'information à travers la phase de délibération, c'est donc contrôler la dynamique de la décision. Savoir discerner l'information utile dans le temps, c'est être capable d'accélérer la dynamique de décision, passer d'une dynamique libre à une dynamique imposée. On parlera alors de pilotage du processus de décision par analogie avec le contrôle d'un système technique (Akharraz, Mauris and Montmain, 2002). Dans sa thèse (Akharraz, 2004), Akharraz désignait la variable régulée comme le risque décisionnel qui mesurait l'incertitude épistémique d'un processus décisionnel dans le temps et qui était d'autant plus grand que les évaluations des alternatives concurrentes étaient proches (le risque de faire le mauvais choix est plus grand si les évaluations sont proches), le système d'information y était vu comme l'actionneur ou l'organe de commande de ce système régulé. Dans ce manuscrit, nous avons généralisé et formalisé les travaux d'Akharraz en mettant en avant le concept d'automatisation cognitive. La phase de délibération peut être contrôlée par le biais de la stabilité des évaluations dans le temps, de la dispersion des évaluations pour une alternative donnée, de l'influence des acteurs de la décision dans un réseau social, de la pertinence des arguments, de la convergence vers un consensus, de la volonté d'être efficient, de l'équité de la sélection collective, etc.

Les situations que nous avons modélisées dans ce manuscrit illustrent ces différents critères de contrôle de la dynamique de délibération. A l'instar des outils de l'automatique classique qui permettent de garantir des systèmes de production plus fiables et plus performants, les outils de l'automatisation cognitive doivent permettre à une organisation de prendre les

décisions les plus fiables et les plus pertinentes. Gérer la variabilité des différents niveaux décisionnels d'un système de management de la sécurité et en contrôler les effets est un enjeu fondamental de la maîtrise des risques. Le support formel qu'apporte l'aide informatique doit amoindrir l'influence de toutes sortes de perturbations : le profil du décideur, l'environnement de travail (qualité des interfaces, temps disponible, qualité de la collaboration, formation et expérience, nombre d'objectifs et de conflits potentiels, qualité de la communication, etc.), la pression sociale, la domination hiérarchique, les modes de représentation (Berthoz, 2003), etc. C'est pourquoi nous avons identifié plusieurs situations de décision collective pour chacune desquelles nous avons proposé un modèle et un système de contrôle. Nous avons considéré une situation de :

- Conseil : un dirigeant (manager, chef de cellule, etc.) s'appuie sur des experts pour réduire les incertitudes au mieux avant de statuer. Le modèle repose sur des techniques d'agrégation multicritère et de fusion d'informations, le contrôle consiste lui à réduire autant que se peut la variabilité des évaluations qui affecte l'incertitude épistémique (Chapitre 2) ;
- Effectivité : les espérances des dirigeants se confrontent aux contraintes opérationnelles, les objectifs aux moyens, un dialogue s'établit pour définir des objectifs atteignables. Notre proposition s'appuie donc sur la confrontation d'un modèle de préférences à un modèle de comportement, le critère de contrôle est le compromis (Chapitre 4) ;
- Efficience : les acteurs de la décision mettent en commun connaissances et moyens pour réaliser au mieux les objectifs, un problème d'optimisation multi objectifs est proposé pour modéliser la situation et le critère de contrôle est le coût—au sens commun du terme donc l'efficience (Chapitre 4) ;
- Rationalité limitée : les acteurs de la décision n'ont pas les mêmes intérêts individuels, mais doivent respecter les contraintes de l'organisation. Une négociation argumentée est proposée avec comme critère de contrôle l'équité dans le partage (moyens, ressources, etc.), le critère de contrôle est le consensus (Chapitre 5) ;
- Pilotage : un dirigeant cherche à se munir d'outils pour orchestrer, piloter la phase de délibération. Les modèles proposés s'appuient d'une part sur la notion d'influence dans un réseau social, et d'autre part sur la force des arguments échangés. Le critère de contrôle est la stabilité des évaluations des alternatives concurrentes (Chapitre 3).

Les critères de contrôle que nous avons proposés permettent le contrôle de la phase de délibération, et en particulier d'imposer une dynamique forcée à la phase d'information. Afin de répondre à la problématique exposée dans le Chapitre 1, nos modèles contribuent également à améliorer la fiabilité humaine et organisationnelle en proposant des représentations :

- explicites des situations de décision sur lesquelles le collectif peut s'appuyer pour résoudre collectivement la situation. Ce partage de la représentation par l'ensemble des acteurs de la décision limite les erreurs de perception et de représentation de la dimension cognitive de l'activité humaine ;

- dynamiques qui permettent d'éviter les erreurs d'adaptation et d'anticipation de la dimension cognitive ;
- qui supportent la confrontation de points de vue, la négociation argumentée et la justification afin d'éviter les erreurs de coordination de la dimension collective ;
- qui supportent le choix des objectifs comme celui de la mise en œuvre afin de limiter les erreurs d'exécution de la dimension opérationnelle.

Notons encore que nous avons présenté ces modèles comme rattachés à différentes situations de décision collective. Une autre façon de voir les choses est de considérer ceux-ci comme autant de représentations nécessaires au management d'activités à risques, *i.e.*, utiles à la modélisation complète d'un processus de décision consistant d'abord à identifier l'alternative la plus pertinente, puis lui fixer des objectifs, et enfin les réaliser au mieux. Les différents modèles que nous avons proposés s'intègrent alors dans une chaîne de traitement de l'information qui gère l'ensemble des décisions de l'activité de management (amélioration d'un système de production complexe, résolution d'une situation de crise, etc.).

A travers ces travaux, nous avons revisité la notion d'automatisation cognitive telle qu'elle avait été abordée dans (Planté, 2010) en proposant des modèles mathématiques qui s'apparentent à des représentations du contrôle-commande de systèmes techniques. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à fiabiliser les décisions collectives sujettes à des perturbations affectant toutes les dimensions de la décision (cognitive, collective, opérationnelle). Nous avons également proposé plusieurs critères pour contrôler la phase de délibération dans une décision. Dans cette perspective de contrôle, les travaux d'Akharraz apparaissent comme un cas particulier (Akharraz, 2004).

Nous avons évoqué de multiples sources de variabilité de la décision qui en affectent la fiabilité et qui se traduisent par autant de paramètres dans nos modèles. Le choix de ces paramètres dépend en particulier de l'attitude que l'on souhaite adopter face aux risques. Pour certains de nos modèles nous laissons à l'utilisateur la possibilité de définir cette attitude en définissant l'opérateur d'agrégation ou le critère à optimiser. Il nous reste à généraliser ce processus à tous les types de décision que nous proposons. L'interactivité avec l'utilisateur de nos modèles ne sera assurée qu'à cette condition.

Nous avons également expliqué comment certains paramètres comme l'influence des acteurs dans un réseau social ou les intérêts individuels peuvent être vus comme des perturbations du processus de décision, alors que si l'on dispose d'un modèle formel suffisant de la situation, ces perturbations peuvent au contraire être envisagées comme des grandeurs de contrôle. L'analogie avec l'automatique classique, le contrôle-commande de systèmes industriels a été essentiellement faite en termes d'objectifs, il nous reste maintenant à aborder l'automatisation cognitive en termes de propriétés : stabilité des systèmes de contrôle proposés, gain en performance, etc.

L'interactivité entre l'utilisateur et le système d'aide à la décision est la condition *sine qua non* pour que l'outil informatique assure la médiation entre une équipe de concepteurs, d'exploitants, etc., et le système complexe qu'elle définit, conduit, etc. C'est pourquoi nous avons accordé une place significative à l'explication, la justification, et l'argumentation de

décisions. En effet, l'interactivité ne peut être réduite à des questions relevant de l'ergonomie cognitive (certes nécessaires mais non suffisantes), elle doit être portée par les modèles de représentation eux-mêmes.

Ces travaux ont été guidés par la perspective de concevoir une boîte à outils d'aide à la décision pour l'amélioration de la résilience de systèmes sociotechniques complexes (Hollnagel, Rigaud and Besnard, 2011) (Hollnagel, Woods and Leveson, 2006). Ce projet nous a guidés dans le choix des situations à modéliser, nous a orientés dans les développements logiciels qui supportent l'ensemble de nos propositions, il reste à démontrer la pertinence de nos modèles et outils sur des cas d'application réels, grande nature.

Bibliographie

Akharraz, A. (2004) Acceptabilité de la décision et risque décisionnel : Un système explicatif de fusion d'information par l'intégrale de Choquet. Thèse de doctorat, Annecy: Université de Savoie.

Akharraz, A., Mauris, G. and Montmain, J. (2002) 'A project decision support system based on an elucidative fusion system', Fifth international conference on Information Fusion (ICIF 02), Annapolis (USA), 593-599.

Aloui, S. (2007) Contribution à la modélisation et l'analyse du risque dans une organisation de santé au moyen d'une approche système. Thèse de doctorat, Paris: Ecole des Mines de Paris.

Amgoud, L., Belabbès, S. and Prade, H. (2004) 'Recherche de consensus entre des agents : une approche possibiliste basée sur l'argumentation', LFA 2004, Nantes (F).

Amgoud, L. and Prade, H. (2009) 'Using arguments for making and explaining decisions', Artificial Intelligence, vol. 173, no. 3-4, pp. 413-436.

Andreewski, E. (1998) 'Langage et construction de la cognition collective', Grand Atelier MCX au Futuroscope, Poitiers (F).

Anzieu, D. and Martin, J.Y. (1982) La dynamique des groupes restreints, Paris (F): Presses Universitaires de France.

Auboyer, A., Brizon, A. and Wybo, J.-L. (2008) 'Intégration du retour d'expériences dans un réseau d'acteurs', congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement, Avignon (F).

Babic, Z. and Plazibat, N. (1998) 'Ranking of enterprises based on multi-criteria analysis', International Journal of Production Economics, vol. 56-57, p. 29-35.

Bainbridge, L. (1983) 'Ironies of Automation', Automatica, vol. 19, no. 6, pp. 775-779.

Bainbridge, L. (1991) Les systèmes experts résoudre-t-ils tous les problèmes des opérateurs. Introductory lecture: Facteurs humains de la fiabilité et de la sécurité des systèmes complexes, Vandœuvre (F): INRS.

Bana E Costa, C. and Changas, M. (2004) 'A career choice problem: an example of how to use Macbeth to build a quantitative value model based on qualitative value judgements', European journal of Operational Research, vol. 153, p. 323-331.

Bana e Costa, C.A., De Corte, J.-M. and Vansnick, J.-C. (2005) On the mathematical foundations of MACBETH. In J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott, editors, Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, New York: Springer Science + Business Media Inc.

Bana E Costa, C. and Vansnick, J. (1997) 'Applications of the Macbeth approach in the framework of an additive aggregation model', Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, vol. 6, no. 2, p. 107-114.

- Baykasoglu, A., Oztas, A. and Ozbay, E. (2002) 'Prediction and multi-objective optimization of high strength concrete parameters via soft computing approaches', *Expert Systems with Applications*, vol. 36, p. 6145–6155.
- Belabbès, S. (2007) *Contribution aux systèmes de délibération multi-agent : une approche argumentative*. Thèse de doctorat, Toulouse: Université Toulouse III.
- Benaben, F., Hanachi, C., Matthieu, L., Couget, P. and Chapurlat, V. (2008) 'A Metamodel and its Ontology to Guide Crisis Characterization and its Collaborative Management', *Proc. 5th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2008)*, Washington DC (USA).
- Benferhat, S., Dubois, D., Kaci, S. and Prade, H. (2002a) 'Représentation bipolaire et modification de préférences en logique possibiliste', *Actes du 13e Congrès Francophone AFRIF-AFIA de Reconnaissance des Formes et d'Intelligence Artificielle (RFIA'2002)*, Angers (F), 955–964.
- Benferhat, S., Dubois, D., Prade, H. and Williams, M.-A. (2002b) 'A practical approach to revising prioritized knowledge bases', *Studia Logica*, vol. 70, pp. 105–130.
- Benferhat, S., Dubois, D., Prade, H. and Williams, M.-A. (2009) 'A general framework for revising belief based using qualitative Jeffrey's rule', *International Symposium on Logical Formalizations of Commonsense Reasoning*, vol. 9, pp. 612–621.
- Benkhannouche, S. (1996) *Aide à la supervision des processus industriels : vers une méthodologie de conception*. Thèse de doctorat, Paris (F): Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- Berrah, L., Mauris, G., Haurat, A. and Foulloy, L. (2000) 'Global vision and performance indicators for an industrial improvement approach', *Computers in Industry*, vol. 43, p. 211–225.
- Berrah, L., Mauris, G. and Montmain, J. (2008) 'Diagnosis and improvement indexes for a multi-criteria industrial performance synthesized by a choquet integral aggregation', *Int. Journal of Management Science, OMEGA*, vol. 36, no. 3, p. 340–351.
- Berrah, L., Montmain, J., Mauris, G. and Clivillé, V. (2011) 'Optimising industrial performance improvement within a quantitative multi-criteria aggregation framework', *International Journal of Data Analysis Techniques and Strategies*, vol. 3, no. 1.
- Berthoz, A. (2003) *La Décision*, O. Jacob.
- Bhushan, N. and Rai, K. (2004) *Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process*, London: Springer-Verlag.
- Bititci, U.S. (1995) 'Modelling of performance measurement systems in manufacturing enterprises', *International Journal of Production Economics*, vol. 42, p. 137–147.
- Bouchon-Meunier, B. (1995) *La logique floue et ses applications*, Paris: Addison-Wesley.
- Bourguet, J.-R., Amgoud, L. and Thomopoulos, R. (2010) 'Towards a Unified Model of Preference-Based Argumentation', In *International Symposium of Foundations of Information and Knowledge Systems*, pp. 326–344.
- Brafman, R. (1987) *Intentions, plans and practical reason*, Massachusetts (USA): Harvard University Press.

- Cauvin, S., Cordier, M.O., Dousson, C., Laborie, P., Lévy, F., Montmain, J., Porcheron, M., Servet, I. and Travé-Massuyes, L. (1998) 'Monitoring and alarm interpretation in industrial environments', *AI Communications The European Journal of AI*, vol. 11, no. 3/4, pp. 139-173.
- Caverni, J.-P., Fabre, J.-M. and Gonzalez, M. (1990) *Cognitive biases*, Amsterdam (NL): North Holland.
- Cellier, J.M. (1990) L'erreur humaine dans le travail. Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, ouvrage collectif sous la direction de J. Leplat et G. de Terssac, (ed. OCTARES Entreprises, pp. 193-209).
- Celse, B., Gentil, S. and Montmain, J. (2007) Chapitre IX : Raisonnement causal, dans *La supervision des systèmes industriels complexes*, sous la direction de S.Gentil, Ed, Hermès.
- Chung, L., Nixon, B., Yu, E. and Mylopoulos, J. (2000) *Non-Functional Requirements in Software Engineering*, Kluwer Publishing.
- Clivillé, V. (2004) *Approche systémique et méthode multicritère pour la définition d'un système d'indicateurs de performance*, Thèse de doctorat, Annecy: Université de Savoie.
- Cordier, M.-O., Dague, P., Lévy, F., Montmain, J., Staroswiecki, M. and Travé-Massuyès, L. (2004) 'Conflicts versus Analytical Redundancy Relations: A comparative analysis of the model based diagnosis approach from the Artificial Intelligence and Automatic Control perspectives', *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, vol. 34, no. 5.
- Couget, P., Benaben, F., Luras, M., Hanachi, C. and Chapurlat, V. (2007) 'Information Systems interoperability as a way to Partners Integration in a Crisis Context', *20th International Conference on Software & Systems Engineering and their Applications (ICSSEA'07)*, Paris (F).
- Daniellou, F. and Simard, M. (2010) 'Facteurs humains et organisationnels de la sécurité industrielle', *les cahiers de la sécurité industrielle*, vol. 2.
- Davis, R. (1983) 'Diagnosis via causal reasoning paths of interaction and the locality principle', *Proceedings National Conference on Artificial Intelligence*, Washington, DC (USA), 88–94.
- De Keyser, V. (1990) Fiabilité humaine et la gestion du temps dans les systèmes complexes. Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, ouvrage collectif sous la direction de J. Leplat et G. de Terssac, (ed. OCTARES Entreprises, pp. 85-108).
- De Terssac, G. and Chabaud, C. (1990) Référentiel opératif commun et fiabilité. in *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*, sous la direction de J. Leplat et G. de Terssac, , (ed. OCTARES Entreprises, pp. 110-139).
- Dempster, A.P. (1967) 'Upper and Lower probabilities induced by multivalued mapping', *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 38, p. 325–339.
- Denguir-Rekik, A. (2007) *Un cadre possibiliste pour l'aide à la décision multicritère et multi-acteurs - Application au marketing et au benchmarking de sites e-commerce*. Thèse de doctorat, Annecy: Université de Savoie.
- Denguir-Rekik, A., Mauris, G. and Montmain, J. (2006) 'Propagation of Uncertainty by the Possibility Theory in Choquet Integral based decision making: application to an E-business Website Choice Support', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 3, pp. 721-728.

- Denguir-Rekik, a., Mauris, G. and Montmain, J. (2009) 'A possibilistic-valued multi-criteria decision-making support for marketing activities in e-commerce: Feedback Based Diagnosis System', *European Journal of Operational Research*, vol. 195, no. 3, pp. 876-888.
- Després, F.M. (1991) *Automatisation des systèmes de production. Du besoin à l'utilisation*, KIRK edition.
- Destercke, S., Dubois, D. and Chojnacki, E. (2009) 'Possibilistic information fusion using maximal coherent subsets', *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 17, p. 79–92.
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G. and Papagyanakis, L. (1992) 'A multicriteria approach for evaluating the performance of industrial firms', *Omega*, vol. 20, no. 4, p. 467–474.
- DiGITIP (2003) *Technologie et sécurité industrielle : Eléments de prospective.*, Etude réalisée par le groupe International et l'Ineris pour la Direction générale de l'industrie, des technologies de l'information et des postes (DiGITIP) du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie.
- Ding, S.X. (2008) *Model-based fault diagnosis techniques : design schemes, algorithms, and tools*, Springer.
- Doumeingts, G. and Ducq, Y. (2001) 'Enterprise modelling techniques to improve efficiency of enterprises', *Production Planning & Control*, vol. 12, no. 2, pp. 146-163.
- Dubois, D., Grabisch, M., Prade, H. and Smets, P. (2001) 'Using the transferable belief model and a qualitative possibility theory approach on an illustrative example: The assessment of the value of a candidate', *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 16, p. 1245–1272.
- Dubois, D., Hajek, P. and Prade, H. (2000) 'Knowledge-driven versus data-driven logics.', *J. of Logic Language and Information*, vol. 9, pp. 65-89.
- Dubois, D., Lang, J. and Prade, H. (1994) Possibilistic logic : in *Handbook of Logic in Artificial Intelligence and Logic Programming*, pp. 439-513. vol. 3, D.M. Gabbay, C. J. Hogger, J.A Robinson, D. Nute (eds), Oxford: Oxford Univ. Press.
- Dubois, D., Moral, s. and Prade, H. (1998) Belief change rules in ordinal and numerical uncertainty theories. pp. 311-392 in DM Gabbay and P Smets (eds), *Handbook of Defeasible Reasoning and Uncertainty Management Systems*, 3rd edition, Belief Change, Kluwer.
- Dubois, D. and Prade, H. (1986a) 'Fuzzy sets and statistical data', *European Journal of Operational Research*, vol. 25, p. 345–356.
- Dubois, D. and Prade, H. (1987a) *Théorie des Possibilités: Applications á la Représentation des Connaissances en Informatique*, 2nd edition, Paris: Masson.
- Dubois, D. and Prade, H. (1987b) 'The mean value of a fuzzy number', *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 24, p. 279–300.
- Dubois, D. and Prade, H. (1988a) 'Representation and combination of uncertainty with belief functions and possibility measures', *Computational Intelligence*, vol. 4, p. 244–264.
- Dubois, D. and Prade, H. (1988b) *Possibility Theory: An Apraoch to Computerized Processing of Uncertainty*, New York (USA): Plenum Press.
- Dubois, D. and Prade, H. (1992c) 'When upper probabilities are possibility measures', *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 49, pp. 65-74.

- Dubois, D. and Prade, H. (1994) 'Possibility theory and data fusion in poorly informed environments', *IFAC Control Eng.*, vol. 2, no. 5, p. 811–823.
- Dubois, D. and Prade, H. (1995) 'Possibility theory as a basis for qualitative decision theory', in *Proc. of the 14th Inter. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI'95)*, Montréal (Canada), 1924–1930.
- Dubois, D. and Prade, H. (1997) 'A synthetic view of belief revision with uncertain inputs in the framework of possibility theory', *Int. J. of Approximate Reasoning*, vol. 17, pp. 295–324.
- Dubois, D. and Prade, H. (1998) Possibility theory: Qualitative and quantitative aspects. in: D.M. Gabbay, Ph. Smets (Eds.), *Handbook of Defeasible Reasoning and Uncertainty Management Systems*, s, vol. 1, pp. 169–226, Dordrecht (NL): Kluwer Academic Publishers.
- Dubois, D. and Prade, H. (2001) A fuzzy set approach to case-based decision. *Computational Intelligence in Theory and Practice*, Physica-Verlag.
- Dubois, D., Prade, H. and Sabbadin, R. (2001) 'Decision theoretic foundations of qualitative possibility theory', *European Journal of Operational Research*, vol. 128, pp. 459–478.
- Dung, P. (1995) 'On the acceptability of arguments and its fundamental role in nonmonotonic reasoning, logic programming and n-person games', *Artificial Intelligence*, vol. 77, p. 321–357.
- Dyer, J.S. (2004) MAUT Multicriteria Utility Theory, in *Multiple Criteria Decision Analysis : state of the art surveys* (ed. by J. Figueira, S. Greco and M. Ehrgott), pp.265–295, Dordrecht (NL): Kluwer Academic.
- Evsukoff, A., Gentil, S. and Montmain, J. (2000) 'Fuzzy Reasoning in co-operative supervision systems', *Control Eng. Practice*, vol. 8, no. 4, pp. 389–407.
- Felix, R. (1994) 'Relationships between goals in multiple attribute decision making', *Fuzzy sets and systems*, vol. 67, p. 47–52.
- Felix, R. (2008) 'Multicriteria decision making (mcdm): Management of aggregation complexity through fuzzy interactions between goals or criteria', *Int. Conf. on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (IPMU)*, Malaga (ESP), 22–27.
- Fishburn, P.C. (1970) *Utility Theory for Decision-Making*, New York (USA): John Wiley & Sons.
- Fishburn, P. (1982) *The foundations of expected utility*, Dordrecht (NL): Reidel.
- Fleurey, F., Delhen, V., Bencomo, N., Morin, B. and Jézéquel, J.M. (2008) 'Modeling and validating dynamic adaptation', 3rd Int. workshop on Models @Runtime (MRT'08), at MoDELS'08, Toulouse (F).
- Fleurey, F. and Solberg, A. (2009) 'A domain specific modeling language supporting specification, simulation and execution of dynamic adaptative systems', 12th Int. conf. Model-Driven Engineering Languages and Systems (MoDELS'09), Colorado (USA), 606–621.
- Frank, P. (1996) 'Analytical and qualitative model-based fault diagnosis, a survey and some new results', *European Journal of Control*, vol. 1, no. 2, p. 6–28.
- Gärdenfors, P. and Rott, H. (1995) *Belief Revision*, Oxford: Oxford University Press.
- Gentil, S. and Montmain, J. (2005) 'Complex systems hierarchical representation supporting human decision-making', *Advanced Engineering Informatics*, vol. 18, pp. 143–159.

- Gentil, S., Montmain, J. and Combastel, C. (2004) 'Combining fdi and ai approaches within causal-model-based diagnosis', *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, vol. 34, no. 5, p. 2207–21.
- Gertler, J. (1997) 'Fault detection and isolation using parity relations', *Control Eng. Practice*, vol. 5, no. 5, pp. 653-661.
- Giorgini, P., Mylopoulos, J., Nicchiarelli, E. and Sebastiani, R. (2002) 'Reasoning with Goal Models', *21st International Conference on Conceptual Modeling (ER02)*, Tampere (Finland), 167-181.
- Giroud, G. (2000) *La théorie des jeux*, Paris: Coll. Champs Université.
- Gonzalez-Baixaul, B., do Prado Leite, J.C.S. and Mylopoulos, J. (2004) 'Visual variability analysis for goal models', *IEEE International Conference on Requirements Engineering (RE)*, Washington (USA), 198-207.
- Grabisch, M. (1996) 'The application of fuzzy integrals in multicriteria decision making', *European Journal of Operational Research*, vol. 89, pp. 445-456.
- Grabisch, M. (1997a) 'k-ordered discrete fuzzy measures and their representation', *Fuzzy sets and systems*, vol. 92, pp. 167-189.
- Grabisch, M. (1997b) 'Alternatives Representation of discrete fuzzy measures for decision Making', *International Journal of Uncertainly, Fuzziness and Knowledge- Based Systems*, vol. 5, p. 587–607.
- Grabisch, M. (2006) 'Representation of preferences over a finite scale by a mean operator', *Mathematical Social Sciences*, vol. 2, no. 52, pp. 131-151.
- Grabisch, M. and Labreuche, C. (2004) Fuzzy measures and integrals in MCDA. In J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott, editors, *Multiple Criteria Decision Analysis*, pp. 563–608, Springer.
- Grabisch, M. and Labreuche, C. (2005a) 'Bi-capacities. Part II : the Choquet integral', *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 151, pp. 237-259.
- Grabisch, M., Labreuche, C. and Vansnick, J. (2003) 'On the extension of pseudo Boolean function for the interacting bipolar criteria', *European Journal of Operational Research*, vol. 148, pp. 28-47.
- Grabisch, M., Nguyen, H.T. and Walker, E.A. (1995) *Fundamentals of Uncertainty Calculi, with Applications to Fuzzy Inference*, Dordrecht (NL): Kluwer Academic.
- Grabisch, M., Orlowski, S.A. and Yager, R.R. (1998) Fuzzy aggregation of numerical preferences. In R. Slowinski, Ed., *Fuzzy Sets in Decision Analysis, Operations Research and Statistics*, Kluwer Academic.
- Grabisch, M. and Perny, P. (1999) Agrégation multicritère. In B. Bouchon-Meunier and C. Marsala, editors, *Logique floue, Principes, Aide à la décision*, IC2, Hermès.
- Grabisch, M. and Roubens, M. (1996) 'The application of fuzzy integrals in multi-criteria decision making', *European J. of Operational Research*, vol. 89, pp. 445-456.
- Grabisch, M., Roubens, M., Murofushi, T. and Sugeno, M. (2000) *Fuzzy Measures and Integrals : Theory and Applications*, Heidelberg (Germany): Physica-Verlag.
- Grabisch, M. and Rusinowska, A. (2009) 'Measuring influence in command games', *Social Choice and Welfare*, vol. 33, pp. 177-209.

- Grabisch, M. and Rusinowska, A. (2009b) 'Influence in social networks', COGNitive systems with Interactive Sensors (COGIS2009), Paris (F).
- Grabisch, M. and Rusinowska, A. (2010) 'A model of influence in a social network', Theory and Decision, vol. 69, pp. 69-96.
- Ha-Duong, M. (2008) 'Hierarchical fusion of expert opinions in the transferable belief model, application to climate sensitivity', International Journal of Approximate Reasoning, vol. 49, p. 555–574.
- Hilty, L.M., Som, C. and Köhler, A. (2004) 'Assessing the Human, Social, and Environmental Risks of Pervasive Computing', Human and Ecological Risk Assessment, vol. 10, p. 853–874.
- Hiltz, S.R. and Turoff, M. (1978) The Network Nation: Human Communication via Computer, Reading, MA (USA): Addison-Wesley.
- Hoc, J.-M. (1996) Supervision et contrôle de processus , la cognition en situation dynamique. Collection Sciences Technol. Connaissances, Presses Universitaires Grenoble.
- Hoede, C. and Bakker, R. (1982) 'A theory of decisional power', Journal of Mathematical Sociology, vol. 8, pp. 309-322.
- Hollnagel, E., Rigaud, E. and Besnard, D. (2011) 'Proceedings of the 4th Resilience Engineering Symposium', Actes du colloque international sur l'ingénierie de la résilience, Sophia Antipolis.
- Hollnagel, E., Woods, D.D. and Leveson, N. (2006) Resilience engineering: Concepts and precepts, Aldershot (UK): Ashgate.
- Imoussaten, A., Montmain, J., Rico, A. and Rico, F. (2010) 'Un modèle dynamique pour la simulation de l'issue d'un débat', LFA'2010, Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications, Lannion (F).
- Imoussaten, A., Montmain, J., Rico, A. and Rico, F. (2011) 'A dynamical model for simulating a debate', International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART2011), Rome (ITA).
- Imoussaten, A., Montmain, J. and Rigaud, E. (2009a) 'Modèle d'influence pour le pilotage d'une décision de groupe', LFA'2009, Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications, Annecy (F).
- Imoussaten, A., Montmain, J. and Rigaud, E. (2009b) 'Interactions in a Collaborative Decision Making Process: Disturbances or Control Variables?', COGNitive systems with Interactive Sensors (COGIS2009), Paris.
- Imoussaten, A., Montmain, J., Troussel, F. and Labreuche, C. (2011a) 'Multi-criteria improvement of options', European Society for Fuzzy Logic and Technology (Eusflat2011), Aix-Les-Bains (F).
- Imoussaten, A., Troussel, F. and Montmain, J. (2011b) 'Improving performances in a company when collective strategy comes up against individual interests', European Society for Fuzzy Logic and Technology (Eusflat 2011), Aix-les-bains (F).
- Isermann, R. and Ballé, P. (1997) 'Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes', Control Eng. Practice, vol. 5, no. 5, pp. 709-719.
- Jarrosion, B. (1994) Décider ou ne pas décider, Paris: Maxima.
- Jezequel, S. (1991a) Challenger, Les Films Roger Leenhardt.

Jezequel, S. (1991b) Tenerife, Les Films Roger Leenhardt.

Jimenez-Losada, A., Fernandez, J.R., Ordóñez, M. and Grabisch, M. (2010) 'Games on fuzzy communication structures with Choquet players', *European Journal of Operational Research*, vol. 207, no. 2, p. 836–847.

Jullien, S. (2008) Systèmes coopératifs de fusion explicitant les dépendances entre les informations : application à l'interprétation d'images tomographiques 3D et à la sélection de films d'animation. Thèse de doctorat, Annecy (F): Université de Savoie.

Jullien, S., Mauris, G., Valet, L. and Bolon, P. (2006) 'Decision aiding tools for Animated film selection from a mean aggregation of criteria preferences over a finite scale', In *Proc. Int. Conf. on Information Processing and Management of Uncertainty (IPMU'06)*, Paris (F), 643–650.

Kagal, L., Finin, T. and Joshi, A. (2001) 'Computer, Trust-Based Security in Pervasive Computing Environments', *Computer*, vol. 12, no. 34, pp. 154-157.

Kahneman, D., Slovic, P. and Tversky, A. (1982) *Judgement under uncertainty: heuristics and biases*, Cambridge University Press.

Kaufmann, A. (1980) *Introduction to the Theory of Fuzzy Sets: Fundamental Theoretical Elements*, New York: Academic Press.

Kaufmann, A. (1988) 'Theory of expertons and fuzzy logic', *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 295-304.

Kaufmann, A. and Gil-Aluja, J. (1993) *Special techniques for the management of experts* (In Spanish), Ed. Milladoiro, Vigo.

Kazman, R., Abowd, G., Bass, L. and Webb, M. (1994) 'Saam: A method for analyzing the properties of software architectures', In *Proceedings of the 16th International Conference on Software Engineering*, Sorrento (ITA), 81–90.

Kazman, R., Klein, M. and Clements, P. (2000) *ATAM: Method for architecture evaluation*. Technical Report CMU/SEI-2000-TR-004, Software Engineering Institute, Carnegie–Mellon University.

Keeney, R.L. and Raiffa, H. (1976) *Decisions with Multiple Objectives Preferences and Value Tradeoffs*, Cambridge University Press.

Kervern, G.Y. (1995) *Éléments fondamentaux des Cindyniques*, Paris: Éditions Economica.

Kim, G., Park, C.S. and Yoon, K.P. (1997) 'Identifying investment opportunities for advanced manufacturing systems with comparative-integrated performance measurement', *International Journal of Production Economics*, vol. 50, p. 23–33.

Krantz, D.H., Luce, R.D., Suppes, P. and Tversky, A. (1971) *Additive and Polynomial Representations*, volume 1 of *Foundations of measurement*, New York (USA): Academic Press.

Kueng, P. and Krahn, A.J. (1999) 'Building a process performance measurement system: Some early experiences', *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 58, no. 3/4, p. 149–159.

Labreuche, C. (2004) 'Determination of the criteria to be improved first in order to improve as much as possible the overall evaluation', *Int. Conf. on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (IPMU)*, Perugia (ITA), 609–616.

- Labreuche, C. (2007) 'Une approche basée sur les coalitions en décision de groupe', Logique Floue et ses Applications, LFA'07, Nîmes (F).
- Labreuche, C. (2009) 'Explication de la comparaison de deux alternatives par une intégrale de Choquet 2-additive', Logique Floue et ses Applications, LFA'09, Annecy (F).
- Latour, B. (1994) 'Sociologie des sciences, analyse des risques collectifs et des situations de crise', Actes du Programme Risques Collectifs et Situations de Crise, 1^{ère} séance, Paris (F), 9-25.
- Lee, H., Kwak, W. and Han, I. (1995) 'Developing a business performance evaluation system: an analytic hierarchical model', Engineering economist, vol. 30, p. 343–357.
- Linstone, H.A. and Turoff, M. (1975) The Delphi Method: Techniques and Applications, Reading, MA (USA): Addison-Wesley.
- March, J. (1988) Decisions and Organization, New-York: Blackwell.
- March, J. (1991) Décisions et organisations, Editions d'Organisation.
- Mareschal, B. and Brans, J.P. (1991) 'Bankadviser: An industrial evaluation system', European Journal of Operational Research, vol. 54, no. 3, p. 318–324.
- Marichal, J.-L. (1998) Aggregation operators for multicriteria decision aid. Thèse de doctorat, Liège (Bel): Institute of Mathematics, Univ. Of Liège.
- Mauris, G., Berrah, L., Foulloy, L. and Haurat, A. (2000) 'Fuzzy Handling of Measurement Errors in Instrumentation', IEEE Trans. on Measurement and Instrumentation, vol. 49, p. 89–93.
- Mélèse, J. (1991) L'analyse modulaire des systèmes, Paris: Editions d'Organisation.
- Merigó, J.M. (2011) 'The uncertain probabilistic weighted average and its application in the theory of expertons', African Journal of Business Management, vol. 5, no. 15, pp. 6092-6102.
- Meyer, P. and Roubens, M. (2006) 'On the use of the Choquet integral with fuzzy numbers in multiple criteria decision support', Fuzzy Sets and Systems, vol. 157, no. 7, pp. 927-938.
- Millot, P. (1988) Supervision des Procédés Automatisés et Ergonomie. Traité des Nouvelles Technologies., Hermès.
- Montmain, J. (2000a) Des modèles pour la supervision. Habilitation à diriger des recherches, Institut Nationale Polytechnique de Grenoble.
- Montmain, J. (2000b) 'Un superviseur pour les apprentis opérateurs ?', NimesTic'2000, Ingénierie système et NTIC, Nîmes (F).
- Montmain, J. (2000c) 'Supervision applied to nuclear fuel reprocessing', AI Communications The European Journal of AI, vol. 2, no. 13, pp. 61-81.
- Montmain, J. (2005) La supervision homme-machine, Encyclopédie Sciences et Techniques de l'ingénieur.
- Montmain, J., Clivillé, V., Berrah, L. and Mauris, G. (2010) 'Preference and causal fuzzy models for manager's decision aiding in industrial performance improvement', FUZZ-IEEE 2010.
- Montmain, J. and Gentil, S. (2000) 'Dynamical causal model diagnostic reasoning for online technical process supervision', Automatica, vol. 36, p. 1137–1152.

- Montmain, J. and Labreuche, C. (2009) 'Amélioration multicritère d'options dans les systèmes complexes', LFA'2009 : Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications, Annecy (F).
- Montmain, J., Mauris, G. and Akharraz, A. (2005) 'Elucidation and Decisional Risk in a Multi Criteria Decision based on a Choquet Integral Aggregation—A Cybernetic Framework', *International Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 13, no. 5-6, pp. 239-258.
- Montmain, J. and Penalva, J. (1998) 'Operators aids : automation and supervision', 9th Symposium on information control in manufacturing, INCOM'98, Nancy-Metz (F).
- Montmain, J. and Sahraoui, S. (2008) 'How to improve the overall industrial performance in a multi-criteria context', *International Conference on Information processing and Management of uncertainty in Knowledge-Based Systems : IPMU*, Malaga (ESP), 22-27.
- Montmain, J., Sanchez, C. and Vinches, M. (2009b) 'Multi criteria analyses for managing motorway company facilities: the Decision Support System SINERGIE', *Advanced Engineering Informatics*, vol. 23, no. 3, pp. 265-287.
- Mouelhi, O., Couturier, P. and Redarce, T. (2009) 'A hybrid search algorithm for multicriteria optimization and evaluation in mechatronic products design', *Advanced Intelligent Mechatronics*, Singapore.
- Moulin, H. (1995) *Cooperative Microeconomics*, Princeton.
- Murofushi, T. and Soneda, S. (1993) 'Techniques for reading fuzzy measures(III) : Interaction index', *Fuzzy system Symposium*, Sapparo (Japan), 693-696.
- Murofushi, T. and Sugeno, M. (1991) 'A theory of fuzzy measures. Representation, the Choquet integral and null sets.', *J. Math. Anal. Appl.*, vol. 159, no. 2, pp. 532-549.
- Neely, A. (1999) 'The performance measurement revolution: why now and what next?', *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 19, p. 205–228.
- Nicolet, J.L. (1990) Outils et démarches pour l'amélioration de la fiabilité des systèmes complexes. Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, ouvrage collectif sous la direction de J. Leplat et G. de Terssac, OCTARES Entreprises.
- Nissen, M.-J. and Bullemer, P. (1987) 'Attentional Requirements Of Learning - Evidence From Performance-Measures', *Cognitive Psychology*, vol. 1, no. 19, pp. 1-32.
- Owen, G. (1995) *Game Theory*, 3rd edition, Academic Press.
- Paschetta, E. and Tsoukiàs, A. (2000) 'A real world MCDA application: evaluating software', *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 9, p. 205–226.
- Penalva, J.-M. (1997) *La modélisation par les systèmes en situations complexes*. Ph.D. thesis, Paris: Université de Paris-Sud, UFR d'Orsay.
- Penalva, J.-M. and Montmain, J. (2002) 'Travail collectif et intelligence collective : les référentiels de connaissances', *IPMU'2002*, *International Conference on Information processing and Management of uncertainty in Knowledge-Based Systems*, Annecy (F).
- Pena, A., Sosso, H. and Gutierrez, A. (2008) 'Causal knowledge and reasoning by cognitive maps: pursuing a holistic approach', *Expert Systems with Applications*, vol. 35, p. 2–18.

- Pignon, J.P. and Labreuche, C. (2007) 'A methodological approach for operational and technical experimentation based evaluation of systems of systems architectures', Int. Conference on Software & Systems Engineering and their Applications (ICSSEA), paris (F), 4-6.
- Piquard, A. (2003) L'informatique omniprésente n'est pas sans danger, <http://www.transfert.net/L-informatique-omnipresente-n-est>.
- Plantié, M. (2006) Extraction automatique de connaissances pour la décision multicritère. Thèse de doctorat, Saint Etienne: Université Jean Monnet de Saint Etienne.
- Plantié, M. (2010) Extraction automatique de connaissances pour la décision multicritère, Éditions Universitaires Européennes.
- Poyet, C. (1990) L'homme, agent de fiabilité dans les systèmes automatisés. Les Facteurs Humains de la Fiabilité dans les Systèmes Complexes, ouvrage collectif sous la direction de J. Leplat et G. de Terssac, OCTARES Entreprises.
- Ragot, J., Darouach, M., Maquin, D. and Bloch, G. (1990) Validation de données et diagnostic. Traité des nouvelles technologies, série diagnostic et maintenance, Hermès Science Publications.
- Rangone, A. (1996) 'An analytical hierarchy process framework for comparing the overall performance of manufacturing departments', International Journal of Operations and Production Management, vol. 16, p. 104–119.
- Rasmussen, J., Pedersen, O.M., Carnino, A., Griffon, M., Mancini, G. and Gagnolet, P. (1981) Classification system for reporting events involving human malfunctions. Report EUR 7444-EN, Commission of the European Communities - Nuclear Science and Technology.
- Reason, J. (1993) L'erreur humaine. Traduit de l'anglais, par J.-M. Hoc, Paris (F): PUF.
- Reber, A.S. (1969) 'Transfer of syntactic structure in synthetic languages', Experimental Psychology, vol. 1, no. 81, pp. 115-119.
- Rescher, N. and Manor, R. (1970) 'On inference from inconsistent premises', Theory and Decision, vol. 1, pp. 179-219.
- Rico, A., Bonnevey, S., Lamure, M. and Tounissoux, D. (2004) 'A debat modelisation with the Sipos integral', LFA'2004, Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications, Nantes (F).
- Rigaud, E. (2010) 'Du management de la sécurité au management de la résilience, énoncé d'un ensemble de vecteurs d'innovation pour la sécurité industrielle', 3ème Forum International sur la Sécurité Industrielle, Innover en sécurité, Toulouse (F).
- Roulin, J.-L. (2006) Psychologie cognitive, Bréal.
- Roux, H. (2004) Maîtrise de la sécurité industrielle. Rapport du groupe de travail présenté par Hubert Roux, http://www.cnisf.org/biblioth_cnisf/etudes/maitrise_securite_industrielle.pdf.
- Rowe, G. and Wright, G. (1999) 'The Delphi technique as a forecasting tool: issues and analysis', International Journal of Forecasting, vol. 15, no. 4, pp. 353-375.
- Rowe, G. and Wright, G. (2001) Expert opinions in forecasting: role of the Delphi technique. In: Armstrong, editor. Principles of forecasting: a handbook of researchers and practitioners, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Roy, B. (1985) Méthodologie multicritère d'aide à la décision, Paris: Economica.

Roy, B. (2004) Pradigms and Challenges. In Figueira J, Greco S, Ehrgott M, eds. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, Dordrecht (NL): Kluwer Academic Publishers.

Roy, B. (2007) A propos de la signifiante des dépendances entre critères : quelle place et quels modes de prise en compte pour l'aide à la décision ?, LAMSADE, Université Paris-Dauphine, Cahier du LAMSADE.

Rusinowska, A. and De Swart, H. (2006) Generalizing and modifying the Hoede-Bakker index. In: De Swart, H., et al. (Eds.), Theory and Applications of Relational Structures as Knowledge Instruments, Heidelberg: Springer's Lecture Notes in Artificial Intelligence.

Saaty, T.L. (1980) The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, McGraw-Hill.

Saaty, T. (2004) The analytic hierarchy and the analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision making, in MCDA. Multiple Criteria Decision Analysis, Figueira, J. Greco S. and Ehrgott M, Dordrecht (NL): Kluwer Academic Publishers.

Sahraoui, S. (2009) Vers un système d'aide à la décision pour l'optimisation de la mise en œuvre de démarches d'amélioration de la performance industrielle. Thèse de doctorat, Annecy (F): Université de Savoie.

Sahraoui, S., Montmain, J., Berrah, L. and Mauris, G. (2007) 'Decision-aiding functionalities for industrial performance improvement', International Federation of Automatic Control Conference on Management and Control of Production and Logistics (IFAC MCPL 07), Sibiu.

Sahraoui, S., Montmain, J., Berrah, L. and Mauris, G. (2007) 'User-friendly optimal improvement of an overall industrial performance based on a fuzzy choquet integral aggregation', IEEE International Conference on Fuzzy Systems, London (UK).

Sanchez, C. (2007) Spécification et Implémentation du Système d'Aide à la Décision Multicritère pour la Maintenance Préventive et la Gestion du Patrimoine de la Société d'Autoroute ESCOTA : le projet SINERGIE. Thèse de doctorat, Paris (F): Ecole des Mines de Paris.

Sanchez, C., Montmain, J., Vinches, M. and Mahieu, B. (2009) 'Planning of Maintenance Operations for a Motorway Operator based upon Multicriteria Evaluations over a Finite Scale and Sensitivity Analyses.', Electrical Engineering, Informatics in Control, Automation and Robotics, vol. 24, pp. 23-35.

Sandri, S., Dubois, D. and Kalfsbeek, H. (1995) 'Elicitation, assessment and polling of expert judgements using possibility theory', IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 3, p. 313–335.

Santos, S.P., Belton, V. and Howick, S. (2002) 'Adding value to performance measurement by using system dynamics and multi-criteria analysis', International Journal of Operations and Production Management, vol. 22, p. 1246–1272.

Scharlig, A. (1985) Décider sur plusieurs critères. Panorama de l'aide à la décision multicritère, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.

Sfez, L. (1992) Critique de la décision, Presses de la Fondation des sciences politiques.

Shafer, G. (1976) A mathematical theory of evidence, Princeton University Press.

Shapley, L.S. (1953) 'A value for n-person games', In Annals Of Maths, vol. 28, no. 2, pp. 307-317.

Simon, H.A. (1977) The new science of management decision, New Jersey: Prentice Hall.

- Simon, H.A. (1980) *Le nouveau management. La décision par les ordinateurs*, Paris: Économica.
- Simon, H.A. (1983) *Administration et processus de décision* (trad. de *Administrative Behavior*, 1947), Paris: Économica.
- Simon, H.A. (1991a) *Science des Systèmes. science de l'artificiel*, traduit par J-L. Lemoigne, Bordas.
- Simon, H.A. (1991b) 'Bounded rationality and Organizational Learning', *Organization Science*, no. 2, pp. 125-139.
- Simon, H.A. (1997) *Models of bounded rationality*, Cambridge MA (USA): MIT Press.
- Sugeno, M. (1974) *Theory of Fuzzy Integral and Its Application*. Thèse de doctorat, Tokyo (Japon): Tokyo Inst. of Technology.
- Sugeno, M. (1977) 'Fuzzy measures and fuzzy integrals: a survey', *Fuzzy Automata and decision processes*, pp. 89-102.
- Suwignjo, P. and Bititci, U.S. (2000) 'Quantitative models for performance measurement system', *International Journal of Production Economics*, vol. 64, p. 231-241.
- Taborin, V. (1989) *Coopération entre Opérateur et Système d'Aide à la Décision pour la Conduite de Procédés Continu*. Thèse de doctorat, Valenciennes (F): Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- Teulier-Bourguine, R. (1997) *Les représentations, médiations de l'action stratégique. La stratégie chemin faisant*, M.J. Avenier edition, Paris: Economica.
- Thurman, D.A., Brann, D.M. and Mitchell, C.M. (1997) 'An Architecture to Support Incremental Automation of Complex Systems', *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Orlando, USA.
- Verdel, T. (2000) *Méthodologies d'évaluation globale des risques - Applications potentielles au Génie Civil*, Paris (F): Presses de l'Ecole Nationale des ponts et Chaussées.
- Villemeur, A. (1988) *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels Fiabilité - Facteurs Humains – Informatisation.*, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Eyrolles.
- Walley, P. (1982) *The elicitation and aggregation of beliefs*. Thèse de doctorat, University of Warwick.
- Wiener, N. (1948) *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine* (1948) publié, en anglais, par la Librairie Hermann & Cie (Paris), The MIT Press (Cambridge, Mass.) et Wiley (New York).
- Yager, R.R. (1988) 'On ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decision making', *IEEE Transaction system*, vol. 18, pp. 183-190.
- Yager, R.R. (1992) 'On the specificity of a possibility distribution', *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 50, pp. 279-292.
- Zadeh, L. (1965) 'Fuzzy sets', *Information & Control*, vol. 8, pp. 338-353.
- Zadeh, L. (1978) 'Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility', *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 1, pp. 3-28.

Zadeh, L. (1995) 'The Concept of a Linguistic Variable and its Application to approximate reasoning, parts 1 and 2', Information Sciences, vol. 8, pp. 199-249, 301-357.

Modélisation et pilotage de la phase de délibération dans une décision collective

- vers le management d'activités à risques -

RESUME : Le management d'activités à risques implique de nombreuses décisions qui mettent en scène un collectif d'acteurs ayant chacun leur domaine d'expertise ou d'action pour concevoir ou exploiter un système complexe. D'abord, le rôle d'un système interactif d'aide à la décision de groupe (SIADG) dans le cadre du management d'activités à risques est analysé. Les fonctionnalités du système sont spécifiées de sorte à minimiser l'impact des erreurs humaines et organisationnelles qui peuvent affecter le processus de décision collectif. Le SIADG est vu comme le médiateur entre l'homme et le système qu'il cherche à maîtriser : il l'aide à percevoir une situation critique, la comprendre, l'interpréter et la diagnostiquer avant d'y remédier, mais il favorise également la résolution collective en constituant un support à la communication et à la coordination des intervenants. La décision est perçue comme un processus dynamique dont le temps de réponse dépend de l'efficacité avec laquelle est menée la phase de délibération. Plusieurs grandeurs et modèles pour contrôler la délibération sont proposés. Un premier type de situation décisionnelle met en scène un manager qui s'entoure d'experts pour prendre une décision sur la base d'un processus de fusion des avis exprimés. L'incertitude attachée à l'évaluation des alternatives est due d'une part, à l'imprécision des avis d'experts, d'autre part aux divergences d'opinions. Le contrôle de cette incertitude permet d'identifier les critères sur lesquels doit se focaliser le débat d'experts. Le concept d'influence dans un réseau social est alors introduit pour proposer deux modèles de pilotage de la phase de délibération d'une décision d'organisation, basé sur la délibération argumentée pour l'un, sur des simulations stochastiques pour l'autre, avec un formalisme d'équations d'état pour représenter l'évolution des convictions au fil du débat. Ensuite, les décisions qui concernent l'amélioration d'un système complexe, où se confrontent la vision stratégique des managers et la vision opérationnelle des exécutants sont abordées. Lorsque des objectifs atteignables ont été négociés, un modèle basé sur un problème de programmation par contraintes permet de calculer une mise en œuvre des actions pour les atteindre. Dans ce cas, soit le collectif est vu comme un ensemble d'agents collaboratifs et la délibération est pilotée par l'efficacité de la décision ; soit comme un ensemble d'agents simplement coopératifs, dont nous modélisons la négociation où se mêlent objectifs collectifs et enjeux individuels, à l'aide de la théorie de l'argumentation. Ces modèles traitent tous du contrôle du processus cognitif que constitue la décision collective : l'automatisation cognitive vise ainsi à réduire les erreurs humaines et organisationnelles qui pourraient affecter la décision en particulier les erreurs d'évaluation et de coordination. Une conclusion et des perspectives achèvent ce manuscrit qui est illustré de plusieurs exemples relatifs au management d'activités à risques.

Mots clés : Décision Multicritère, Théorie de l'Argumentation, Programmation par Contraintes, Théorie des Jeux

Modeling and control of the deliberation phase in a collective decision

- towards the management of risk activities -

ABSTRACT: The management of risk activities involves many decisions that concern a group of actors with different areas of expertise or action to design or operate a complex system. First, we focus on the role of an interactive group decision support system (GDSS) in the management of risk activities. The functionalities of the system are specified so as to minimize the impact of human and organizational errors that may affect collective decision-making. The GDSS is seen as the mediator between human beings and the system they aim to control: it supports them detecting critical situations, understanding situations, interpreting and diagnosing before remedy, but it also promotes collective resolution as a medium for communication and coordination of stakeholders. The decision is seen as a dynamic process whose response time depends on the efficiency with which the deliberation phase is managed. Several variables and models to control the debate are thus proposed. A first type of decisional situation depicts a manager who requires the support of a panel of experts to make a decision based on a process of fusion of expert advice. The uncertainty attached to the evaluation of alternatives is due in part to the imprecision of expert opinion, divergences of opinion between experts. A control model is proposed to manage this uncertainty and identify the criteria on which to focus the panel discussion. We then turn to the concept of influence in a social network to offer two models of control of the deliberation phase. One is based upon argued deliberation and the other one on stochastic simulations with a formalism of state equations to represent the evolution of beliefs during the debate. Next, decisions that concern improvement of a complex system are presented. Strategic and operational points of view are confronted in such a process. When achievable goals are negotiated, a model based on a problem of constraint programming techniques is used to compute the most efficient actions to be carried out to perform the improvement. In this case, either the collective is seen as a set of collaborative agents and deliberation is driven by an efficient decision; or the agents are simply cooperative, with collective goals but individual issues and thus the negotiation model is based on argumentation theory. Our models all deal with the control of a cognitive process, i.e., collective decision: cognitive automation aims to reduce human and organizational errors that could affect the decision in particular assessment and coordination errors. Conclusion and perspectives complete this manuscript which is illustrated with several examples related to the management of risk activities.

Keywords : Multicriteria decision, Argumentation theory, Constraints programming, Game Theory.